

## 内界センサを用いたテザードローンの状態推定

テザードローン：ケーブルで地上に繋がれたドローン

### 研究背景

- 地上のバッテリーとの接続で長時間飛行可能
  - ドローンとテザーの扱いに注意を要する
- ↓
- テザードローンの状態を推定



<https://k-tai.watch.impress.co.jp/docs/news/1032632.html>

### 先行研究 [1]

内界センサの値と機体の推力を用いた状態推定手法を提案

- 課題**
- 推定精度低下の考察が困難
  - 飛行中の推力を一定値と仮定した

[1]Sergei Lupashin and Raffaello D' Andrea, "Stabilization of Flying Vehicle on a Taut Tether using Inertial Sensing"2013 IEEE/RSJ IROS

### ➤ 推定手法

Unscented Kalman Filter (UKF)

- 非線形カルマンフィルタの一種
- シグマポイントを用いて線形化せずに推定値の平均や分散を計算

### 本研究の目的

#### シミュレーション

- 状態推定手法の有効性を検証
- 精度低下の要因の考察

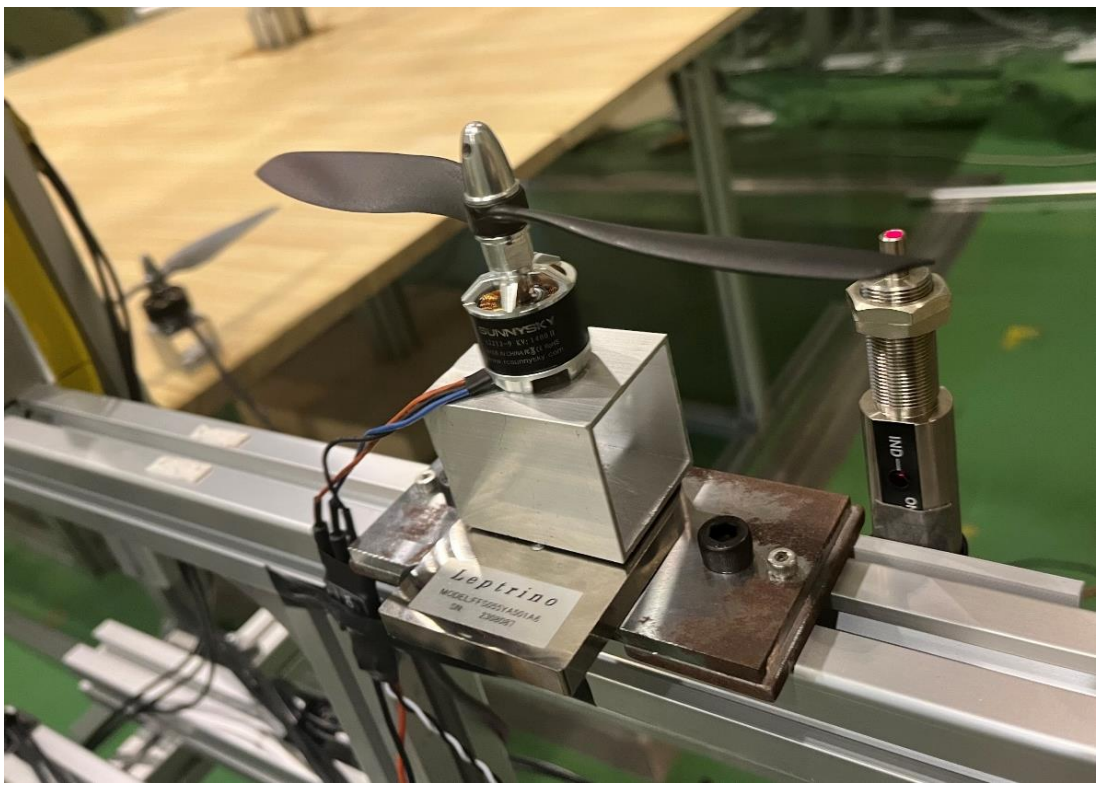
#### 実機実験

- 飛行中の推力を算出することで推定精度向上
- 実環境での飛行が推定精度に与える影響の考察

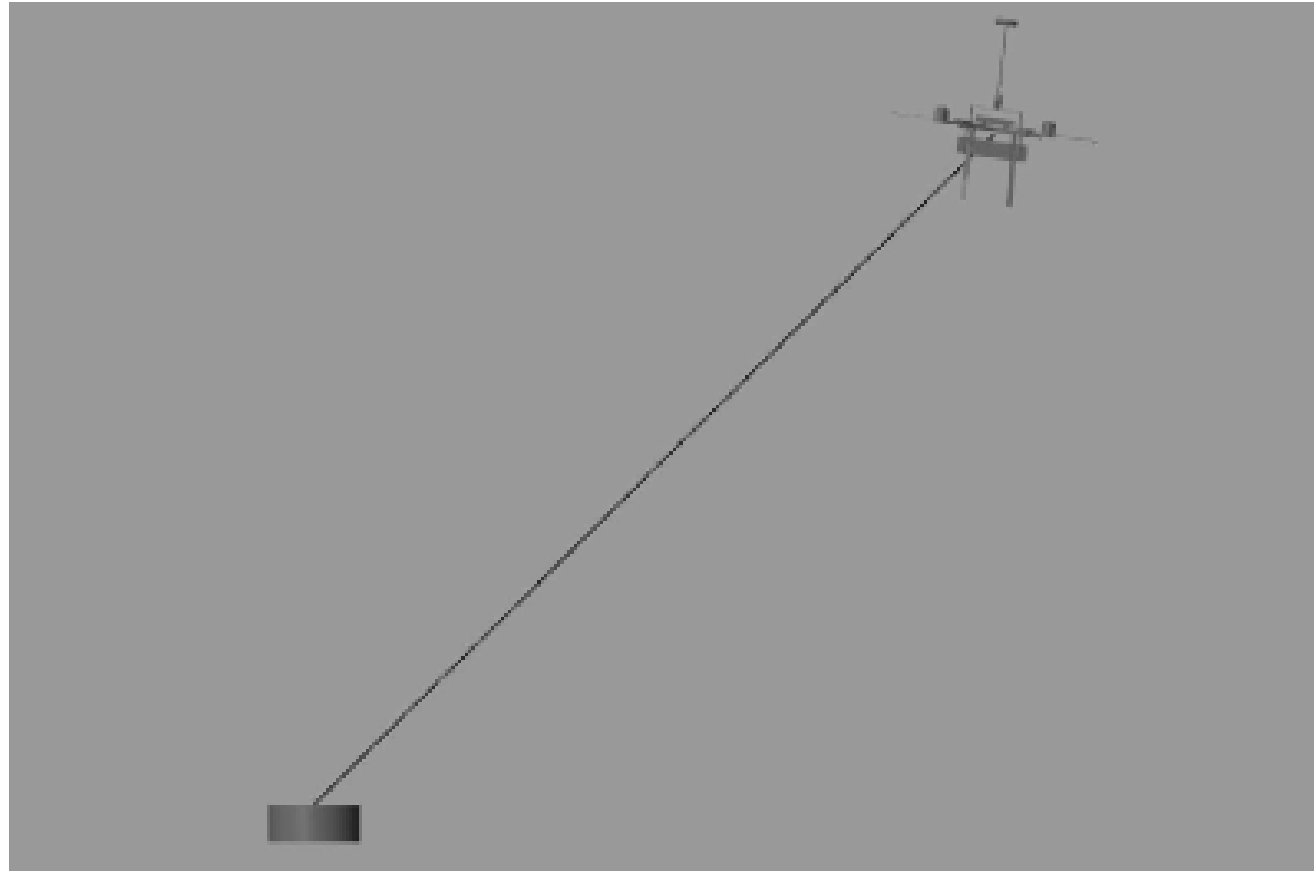
#### ➤ 推力試験

**課題**：飛行中の推力が分からない  
推力一定を仮定していた

PWMと推力の関係を取得



#### ➤ シミュレーション



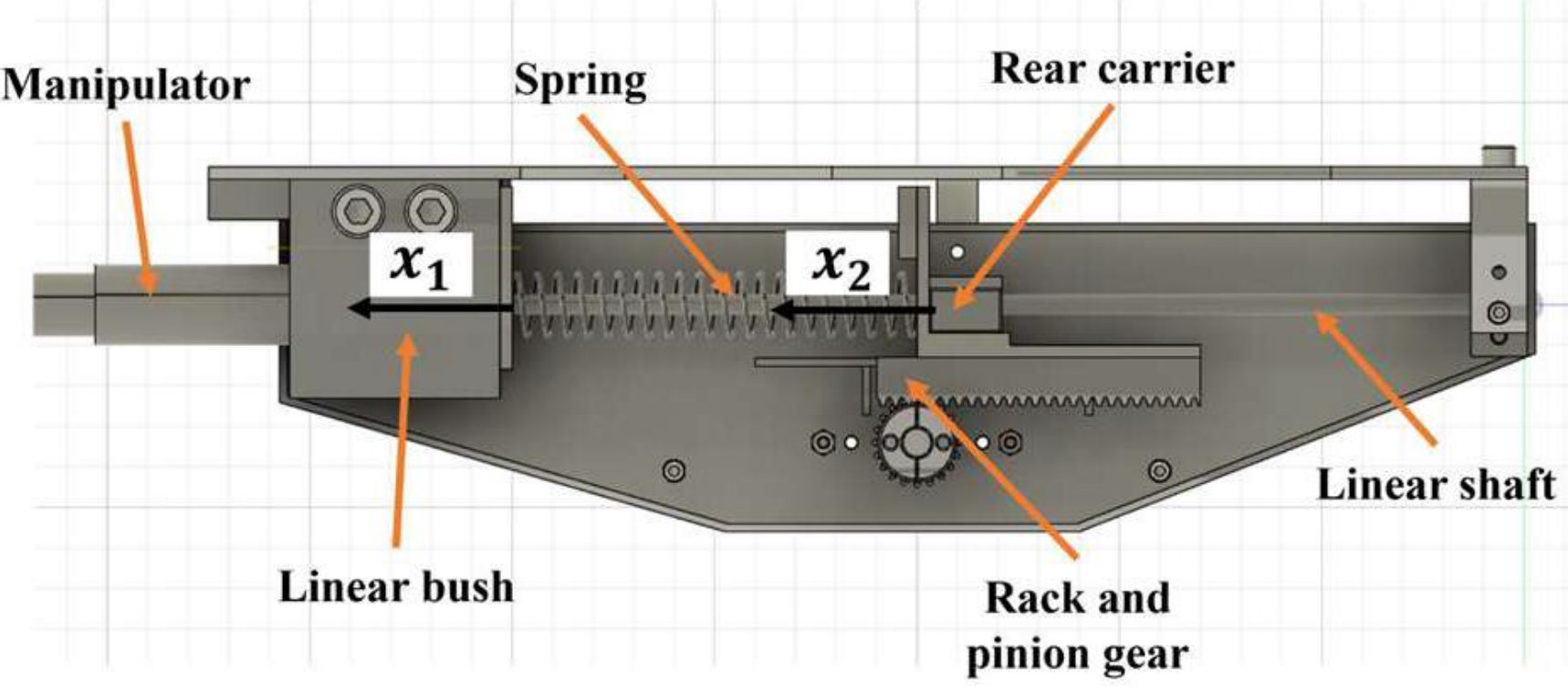
#### ➤ 実機実験



## エアリアルマニピュレータの不安定化抑制機構に関する研究

### マニピュレータの物体との接触の影響

### 姿勢不安定化を抑制する機構を開発



#### 可変コンプライアンス機構

コンプライアンス：マニピュレータの**柔らかさ**

マニピュレータの変位 $\Delta x'_1$ に応じた後部キャリアの移動により見かけ上のバネ定数 $k'$ が可変となる

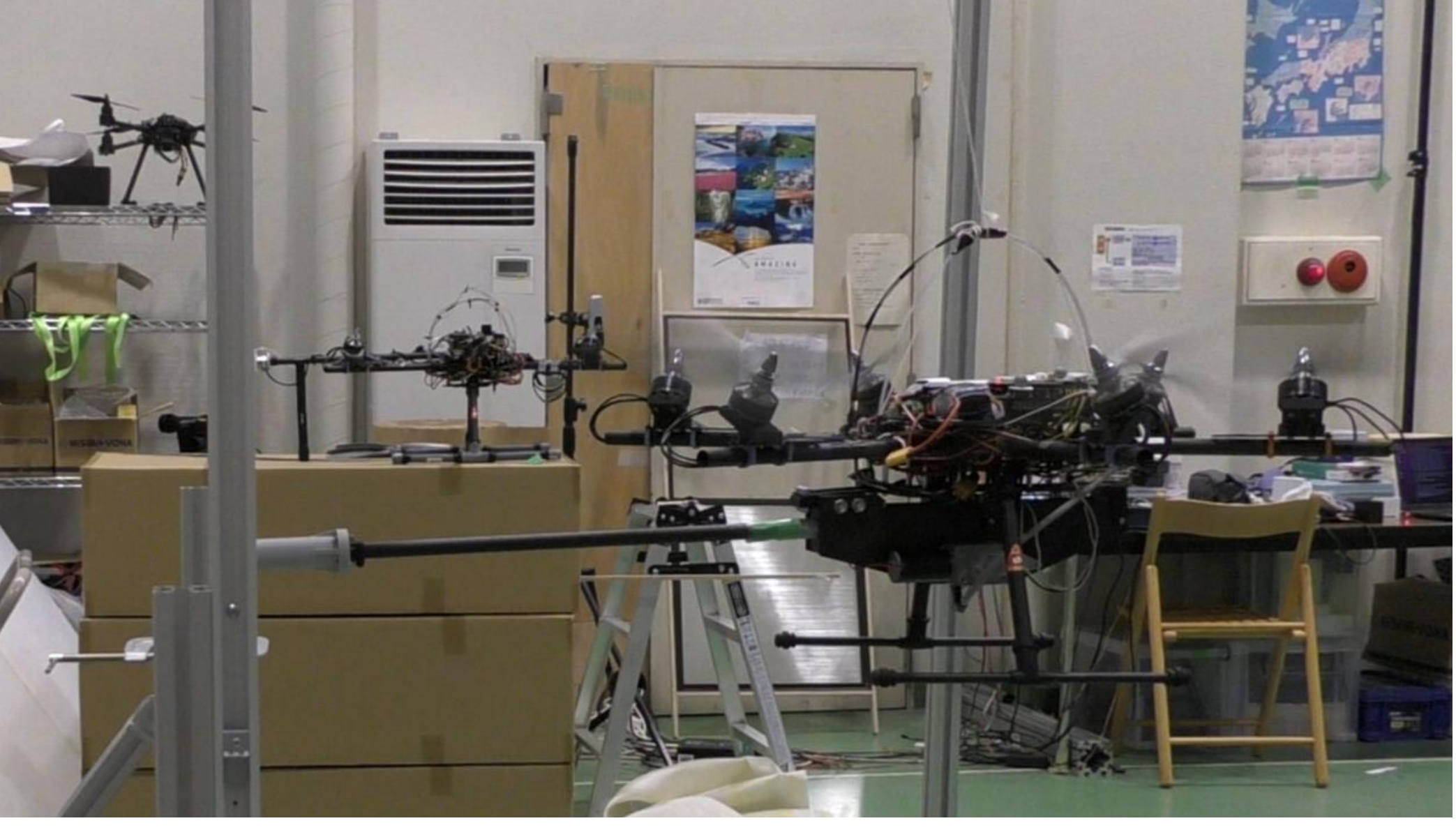


物体と接触する際の状況や目的に柔軟に対応

**低剛性**  
接触による不安定化を抑制

**高剛性**  
高い接触力を発揮  
タッピングへの応用

#### ➤ 壁に接触する実験の様子



- 低剛性では接触による不安定化を抑制
- 高剛性では高い接触力を発揮

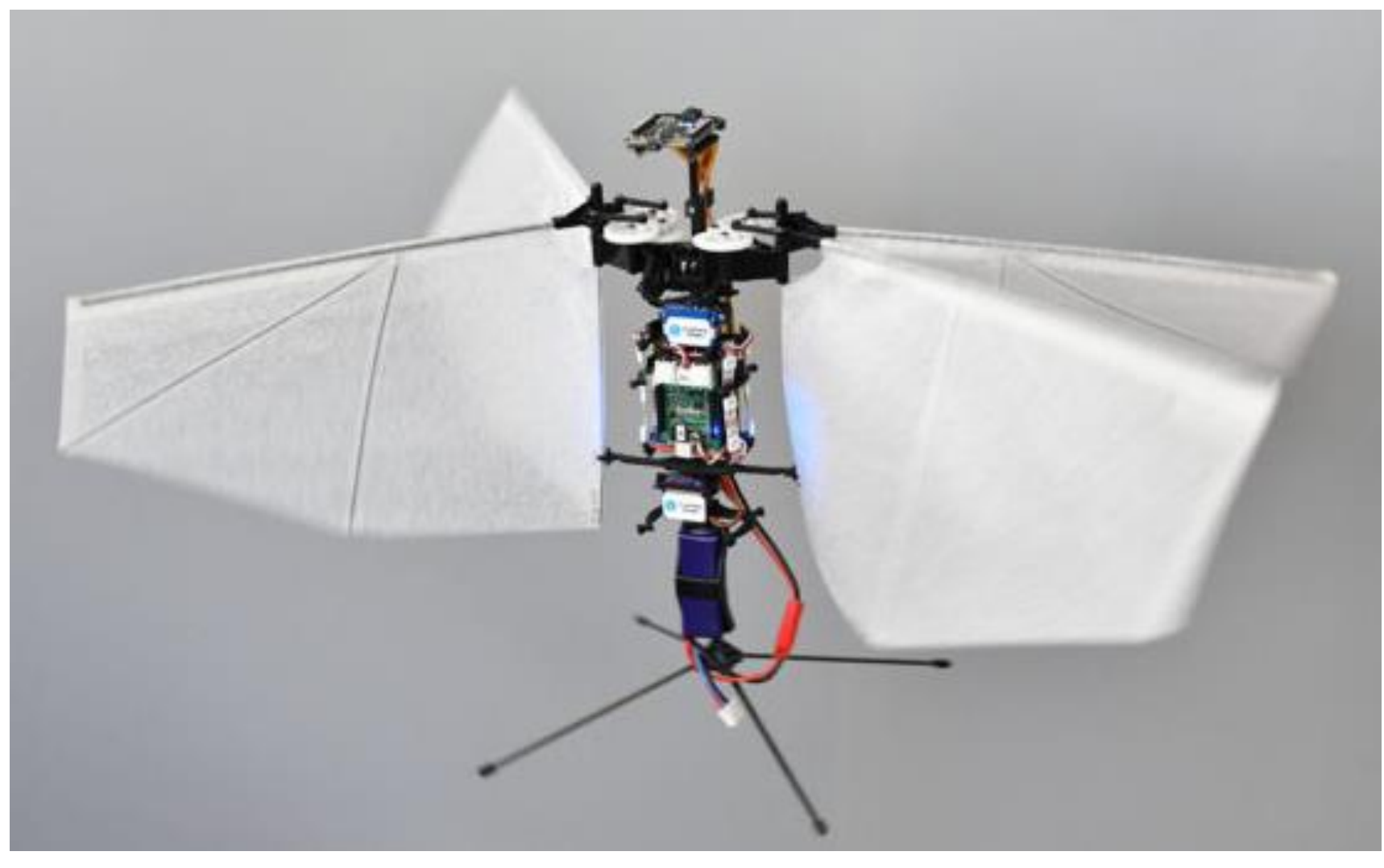
➡ 今後は高剛性時の振動抑制を目指す

## 生物規範型Perching Mechanism(止まり木構造)に関する研究

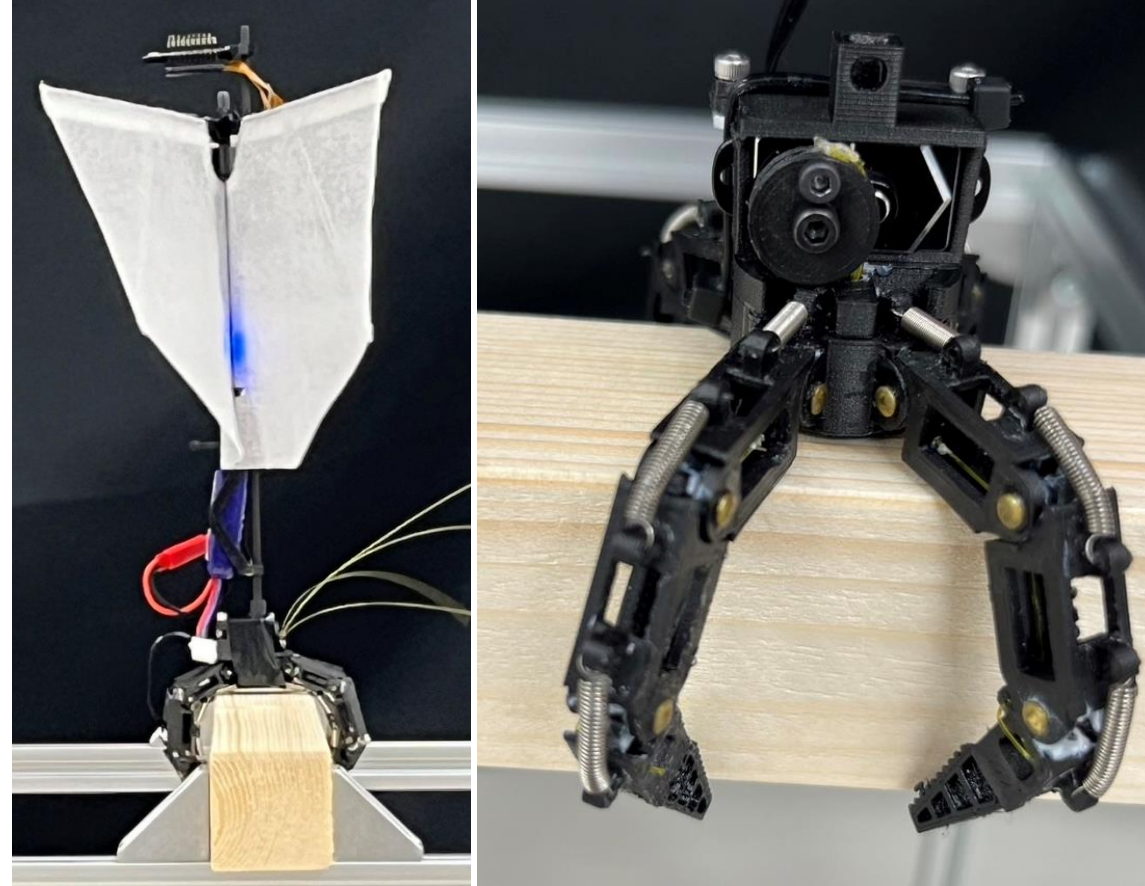
羽ばたき型ドローンに適用する止まり木(Perching)構造の開発

- 飛行エネルギーの大幅な節約
- 物体の把持運搬

が可能となる

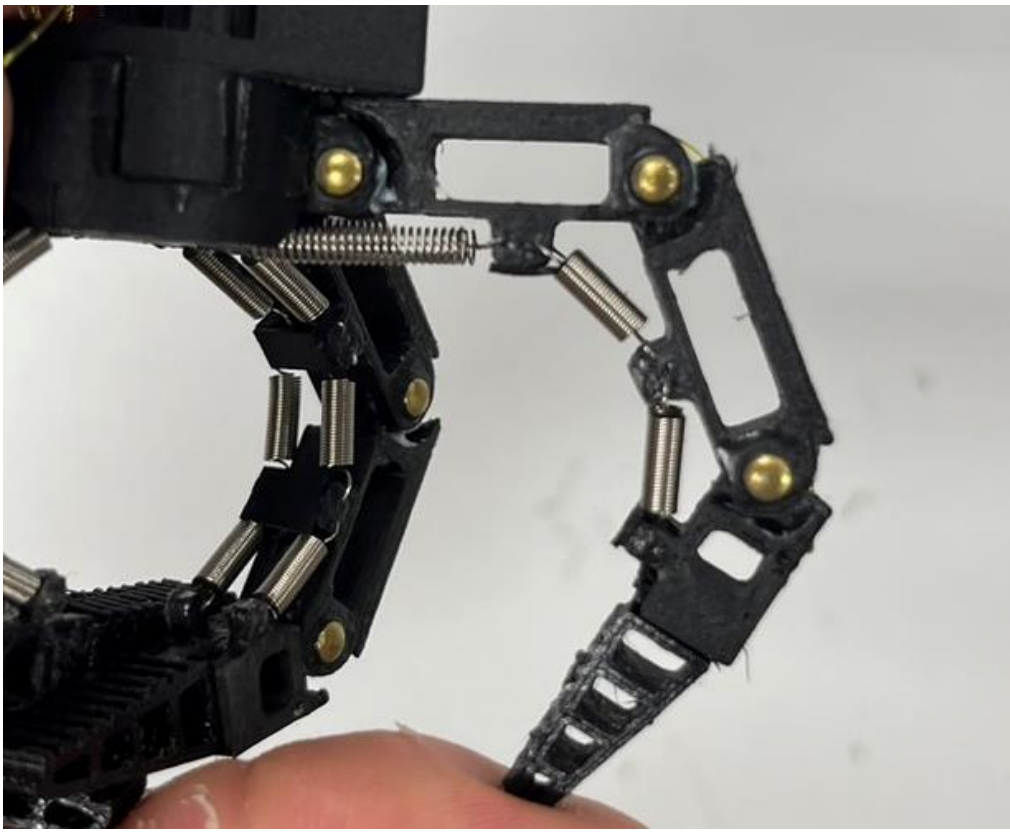


⇒より「鳥」に近いUAVの開発を目指す



- ①糸を引いてグリップする機構
  - ②バネそのものでグリップする機構
- の2種類を提案

グリップ力検査，風洞実験を行い，どちらの構造が良いか検証



応力解析等を行い，グリップ時の形状(関節長など)を最適化

バネそのものがグリップ力を提供  
⇒サーボモーターの張力容量に制限されない



## 点字ブロックパターン追跡および障害物検出のための UAV アプリケーションの開発

### 本研究の目的

バリアフリー法をサポートするために無人航空機 (UAV) を使用して検査タスクを実行し、点字ブロックに障害物がないことを確認して、視覚障害者がエリアを安全に移動できるようにする

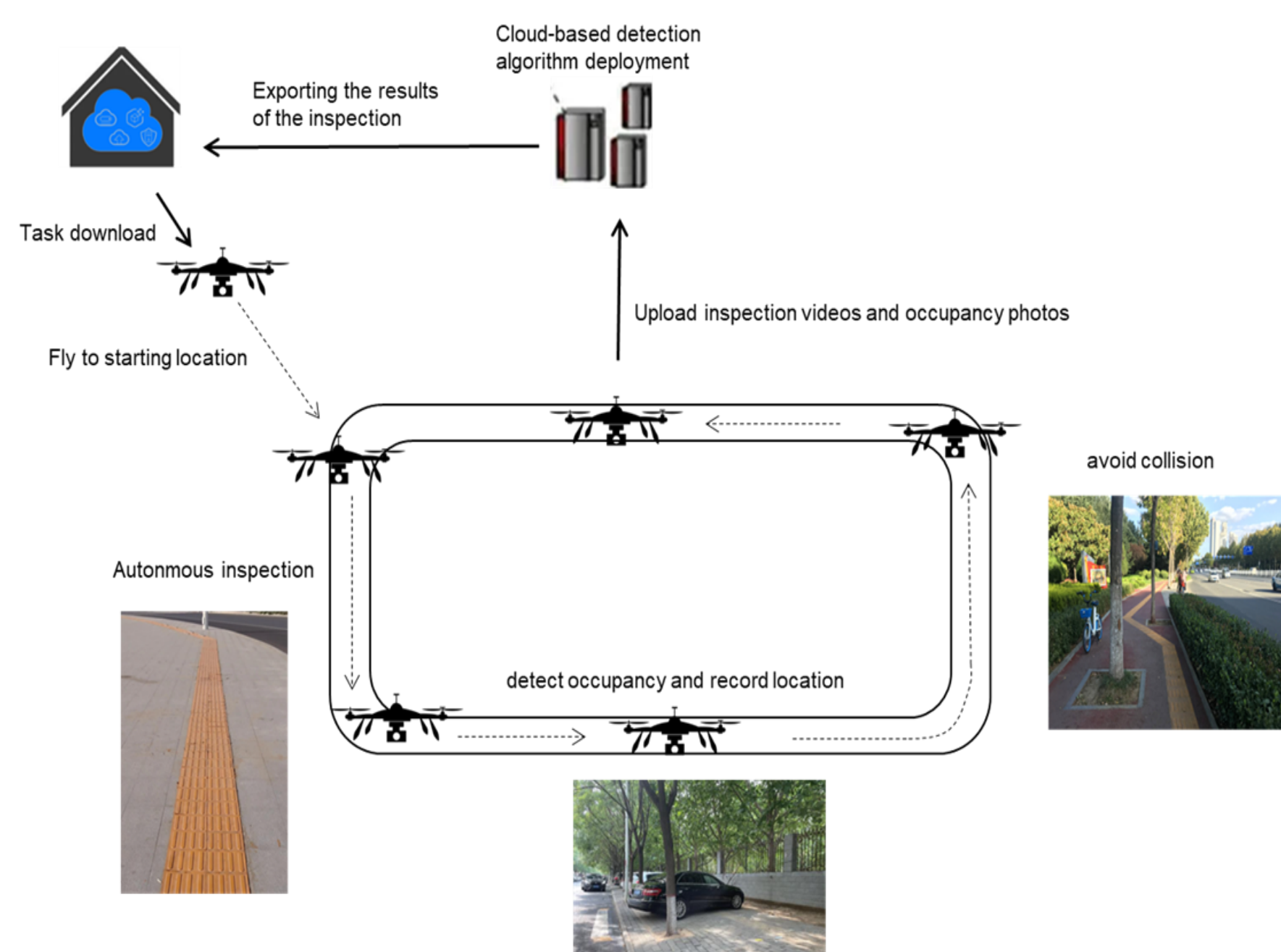
### サブ目標

1. 指向性境界ボックス (OBB) 技術を使用した視覚ベースの点字ブロック検出システムの開発
2. 点字ブロック上の障害物 (車、自転車など) を検出するための視覚ベースのシステムの開発
3. 高高度の障害物 (木、鳥、電線など) を検出するための視覚ベースのシステムの開発
4. 点字ブロックのパターンに従い、静的および動的障害物 (他の UAV を含む) を回避し、必要に応じて車線を変更するための UAV ガイダンス、ナビゲーション、および制御システムの開発



### 研究計画

1. クラウドベースの指示  
UAV は、クラウドベースの中央ステーションから指示を受け取り、検査タスクを実行する
2. 点字ブロックの検出と衝突回避  
a.OBB 検出アルゴリズムを使用して、点字ブロックの方向と位置を決定する  
b.障害物を回避しながら、点字ブロックのパスに沿って移動するためのモーションプランナーを開発する



### 3. 障害物検出

点字ブロック占有検出とエッジ検出技術を統合して、検査タスクを強化する

### 4. データ収集とレポート

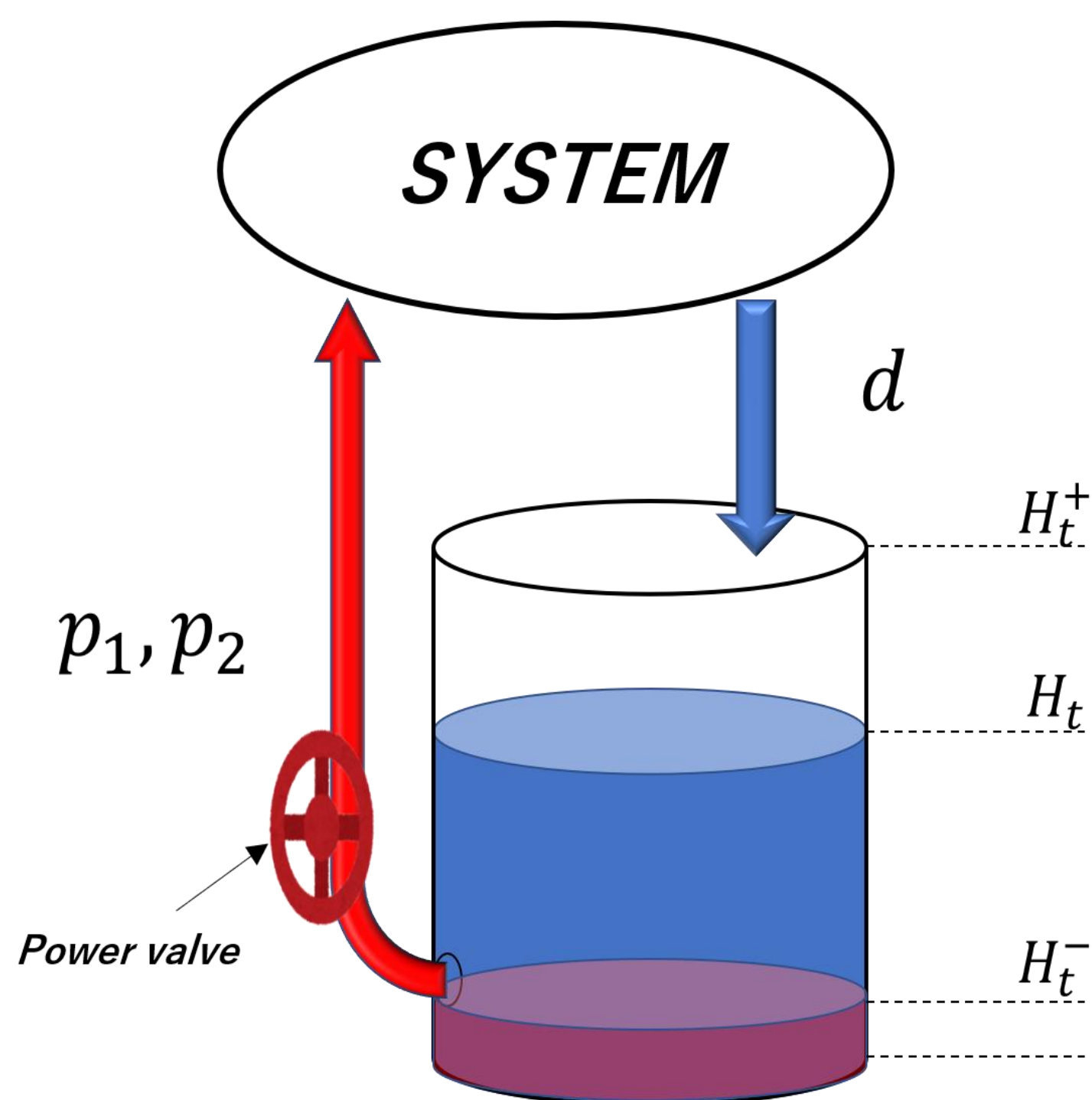
飛行ミッションを完了すると、UAV は検査データをクラウドにアップロードする このデータは分析され、検査レポートが生成されて、さらに確認するために中央ステーションに送信される

## Wrench最適化された空中プラットフォームの設計と制御に関する研究

### 6 自由度独立制御可能な非平面ヘキサコプタを用いたPulling/Pushing(PP) タスクとSlide-Opening(SO) タスク

- ・ Adaptive Energy Tank-based Policy を用いた**ロバスト制御系**を設計する→**新たな手法の提案**
- ・ 非平面ヘキサコプタのロータ角度を最適化することで**任意の方向に強い力・トルク**を出せるようにする

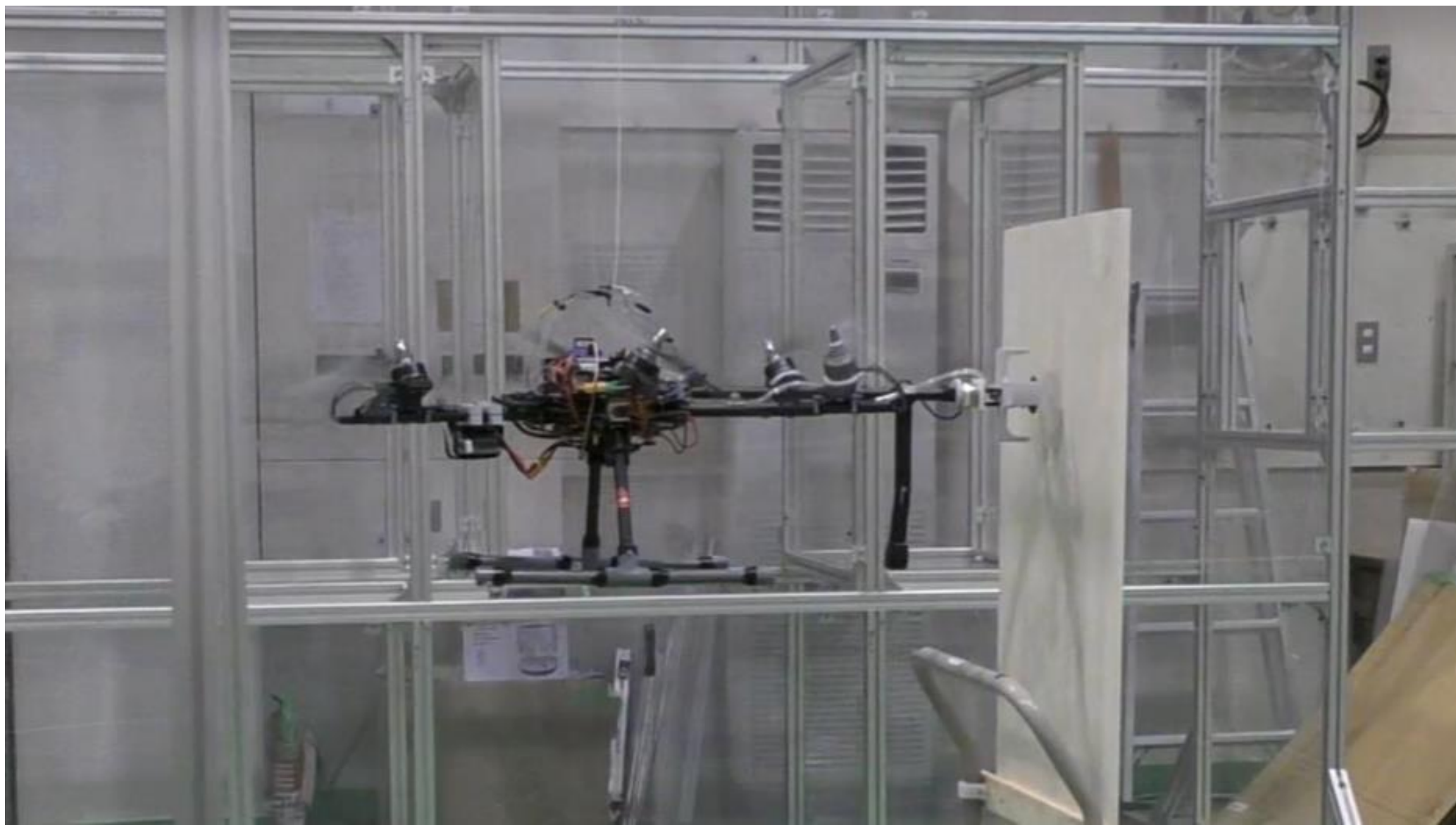
#### Adaptive Energy Tank-based Policy



適応型エネルギータンクは $H_t^-$ で定められた下限があり、タンクのエネルギーが設定された下限値に到達しない限り、システムの安定性を確保することができる。ただし、外部からの擾乱や衝突によって $H_t^-$ の違反が発生する可能性があるため、非常に保守的[制限的]である

→**未知の環境と相互作用する場合は多くの未知数がある**

#### ➤ 台車を押す実験の様子

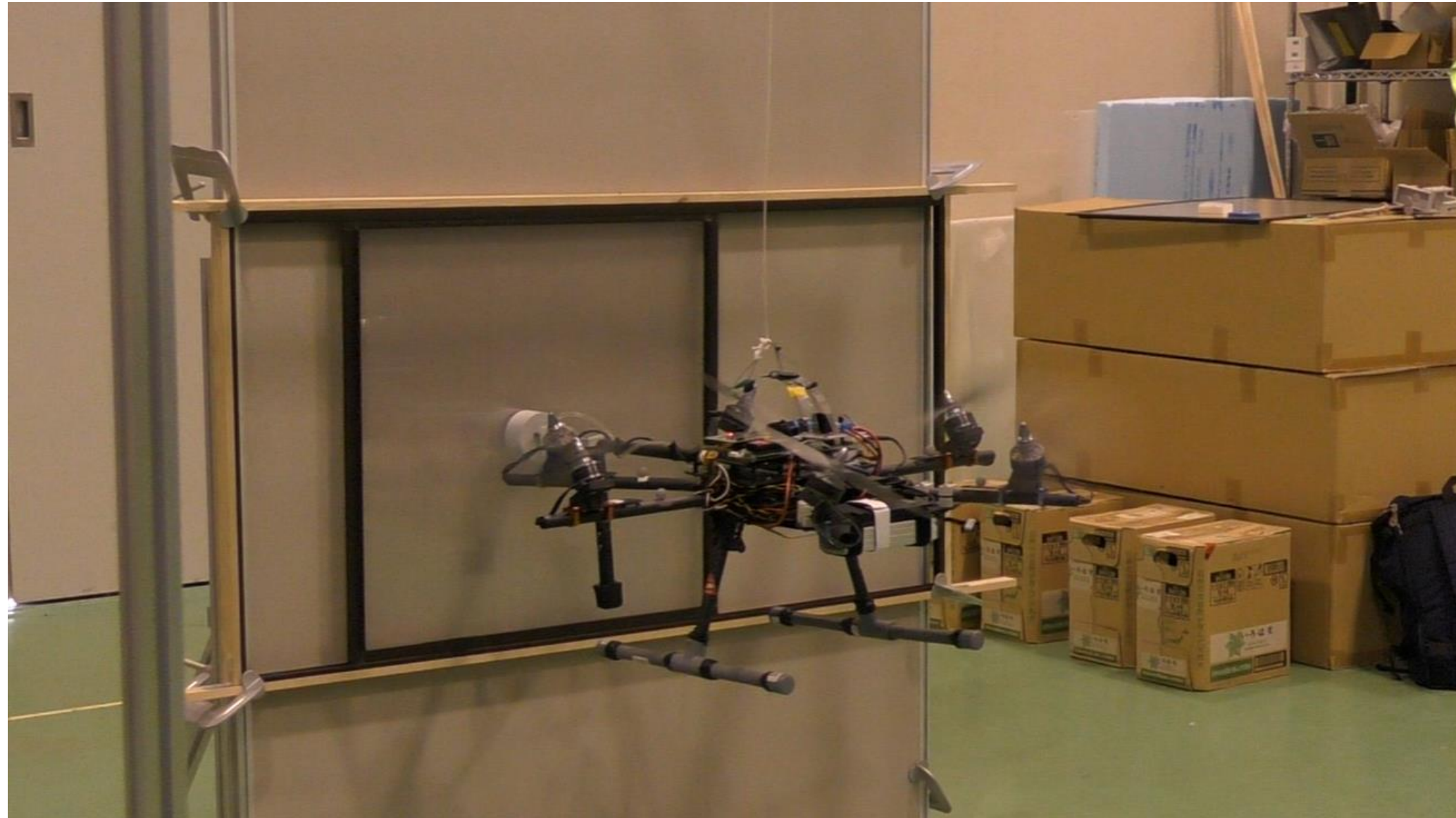


#### Pulling/Pushingタスク(実機)

- ポリシーにより高効率な飛行
- 姿勢変化：2分の1以下に抑制
- 安定的な接触：台車から離れず常に接触
- 一定速度での作業：速度ピークが2回→1回に

➡ **定常的な動作での作業の実現**

#### ➤ 窓開け実験の様子



#### Slide-Openingタスク (シミュレーション)

- 安定性：墜落の防止
- タスクの進行率：90%以上
- ×位置指令値との定常偏差の残存
- ×摩擦力が大きいと早い段階で静止

➡ **実機において、有効性の確認が必要**



## 未知雑然環境におけるUAVナビゲーションシステムの研究

### 本研究の目的

複雑な環境で飛行するドローンの能力を最大限に引き出すには既存の研究[1] [2] [3]では，実環境でドローンとその複雑な環境をモデル化することは非常に困難である

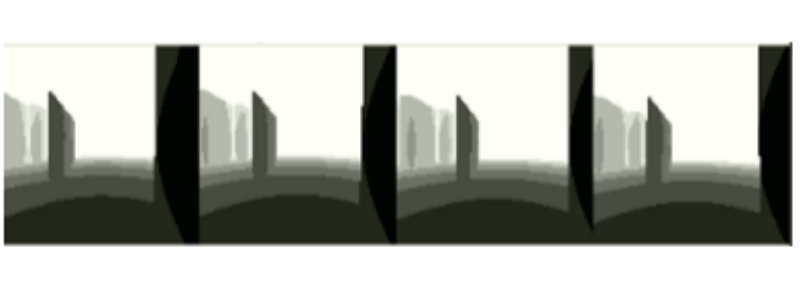
そこで経験的な飛行データから最適な計画と制御戦略を学習できる，未知の環境におけるモデルフリー強化学習に基づく新しい方法を提案する

[1] Araujo, P.; Miranda, R.; Carmo, D.; Alves, R.; Oliveira, L. Air-SSLAM: A Visual Stereo Indoor SLAM for Aerial Quadrotors. IEEE Geosci. Remote. Sens. Lett. 2017, 14, 1643–1647.

[2] Shi, L.; Li, W.; Shi, M.; Shi, K.; Cheng, Y. Opinion Polarization Over Signed Social Networks with Quasi Structural Balance. IEEE Trans. Autom. Control. 2023, 99, 1–8.

[3] Bailey, J.P.; Nash, A.; Tovey, C.A.; Koenig, S. Path-length analysis for grid-based path planning. Artif. Intell. 2021, 301, 103560.

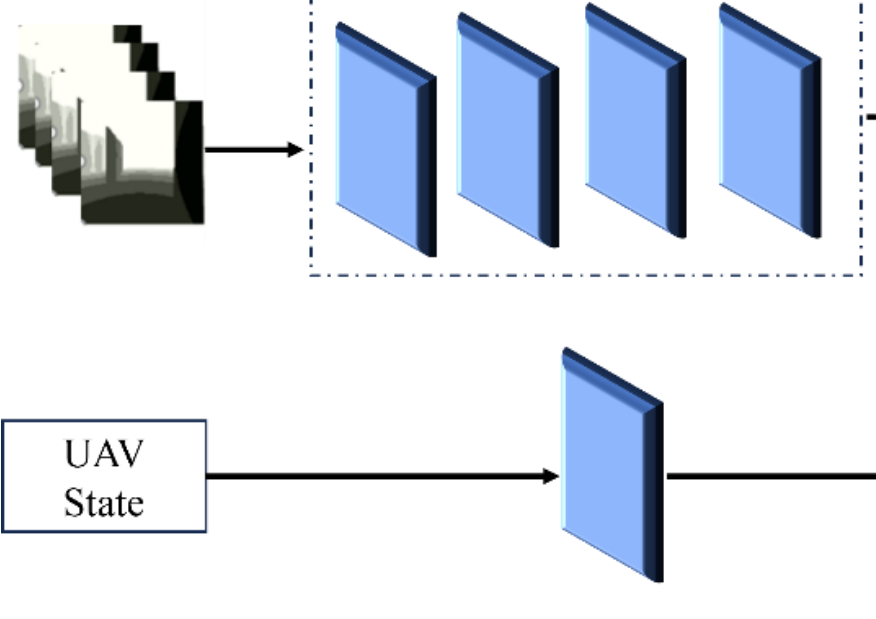
4コマ画像スタッキング



UAV States

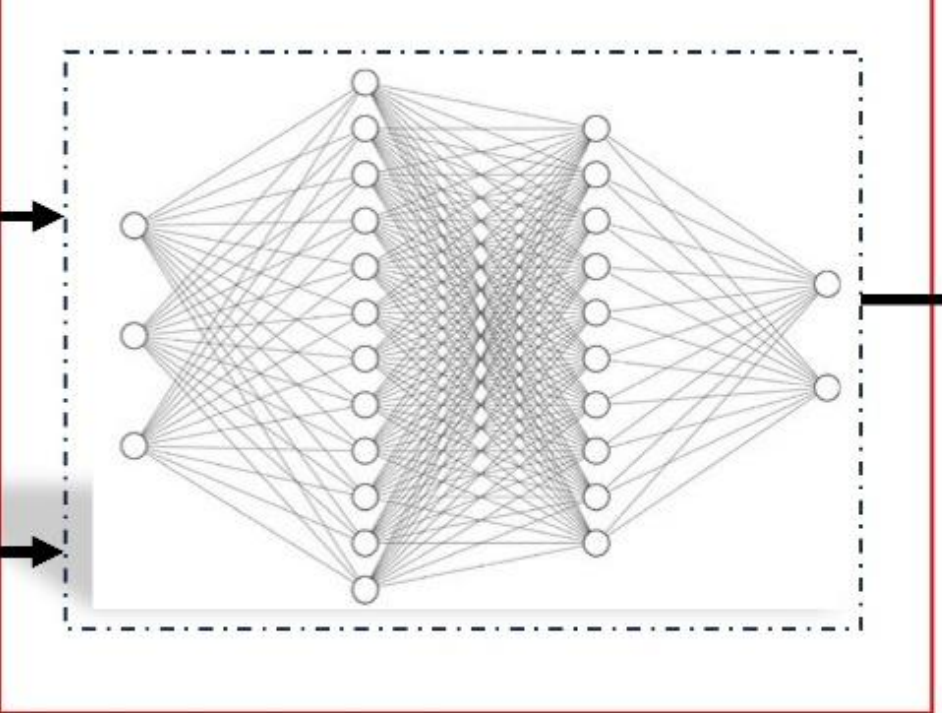
- X Velocity
- X Position
- Y Position
- Yaw rate
- Yaw Angle
- Z altitude

CNN: 環境特徴の抽出



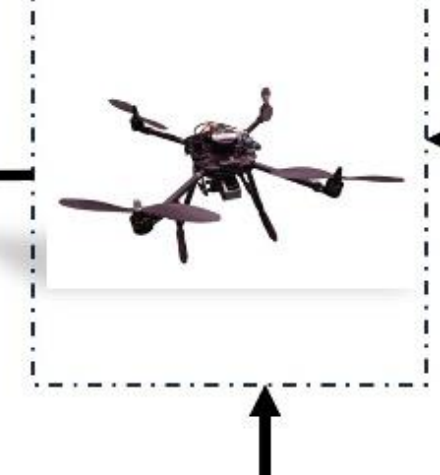
システム入力: ドローンのステータス  
やドローンが視覚的に認識する障害物など

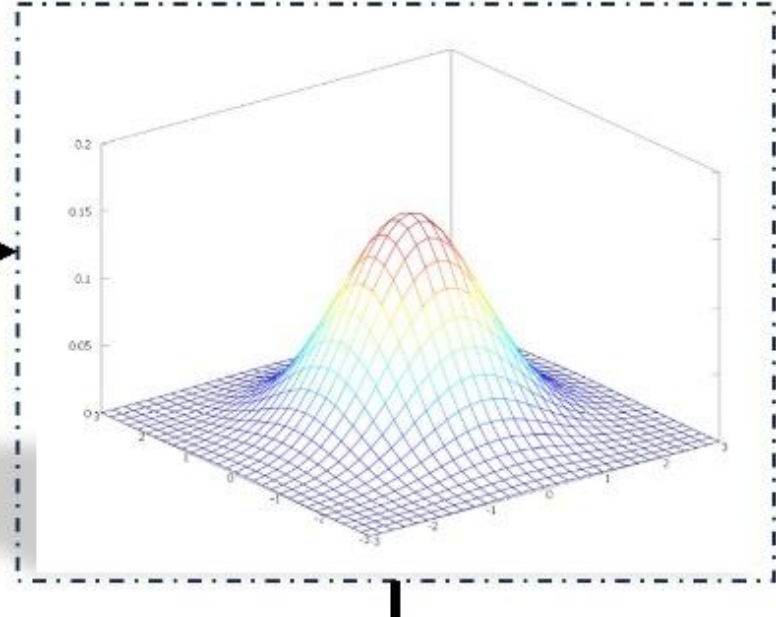
\*RL

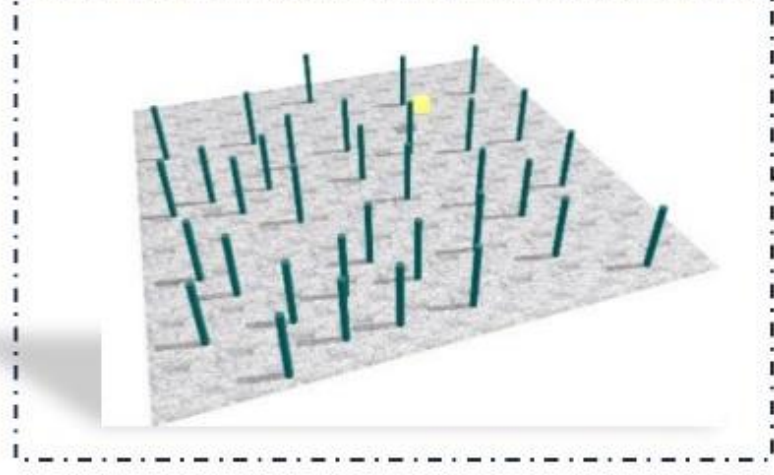


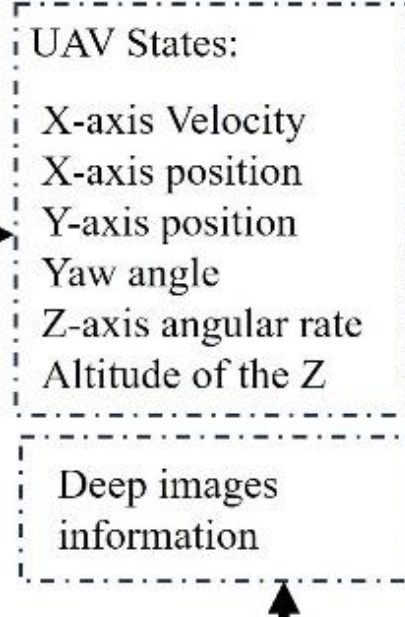
システム出力: ドローンの速度  
と方向コマンド

Sample the Control Command from the distribution









## End2End学習アルゴリズムを用いた自律ドローンナビゲーションに関する研究

### 研究背景

- 森林での捜索救助活動
- 橋梁の点検

→ 障害物を効率的に回避し，目的地に迅速に到達することが重要

### 従来の非学習ベースの方法

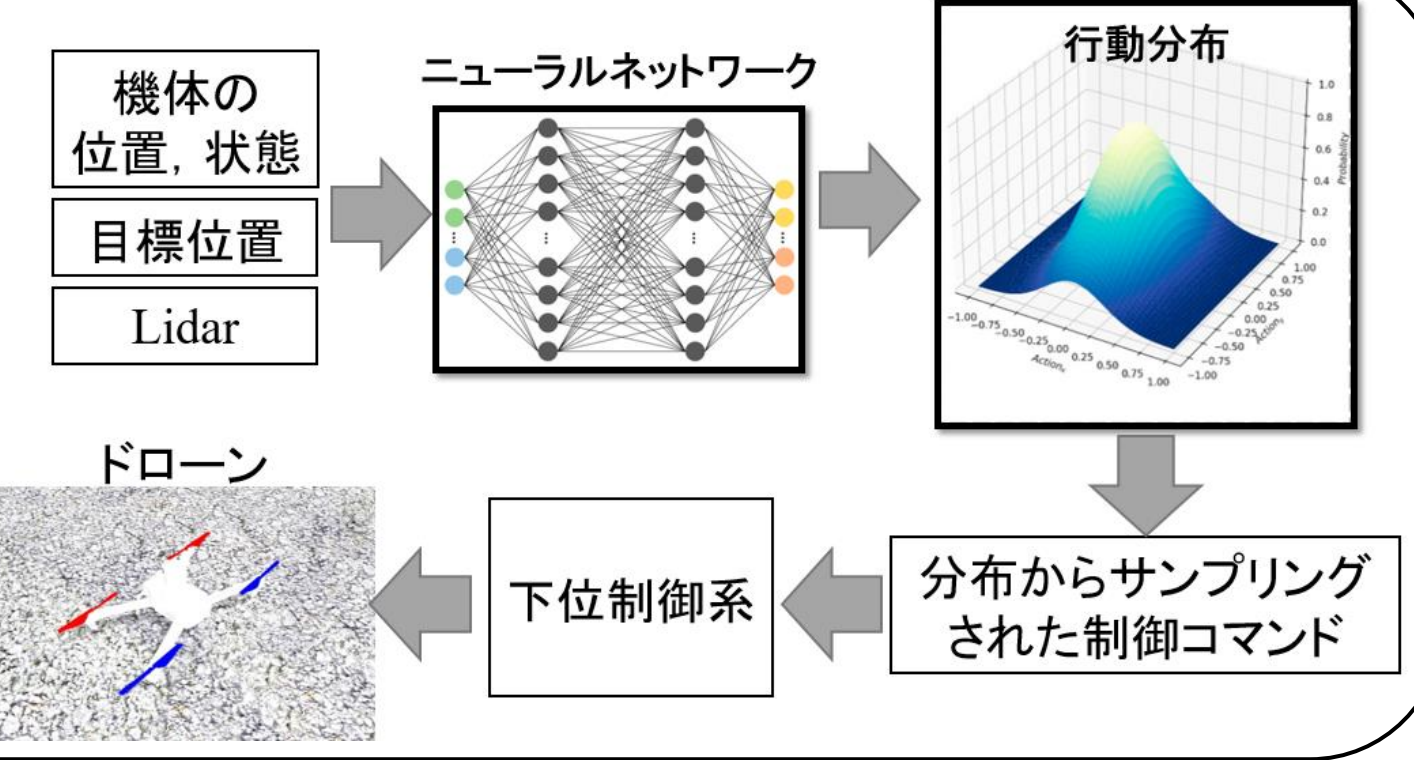
- 明示的な経路計画が必要
- 計算リソースが大きくなる場合がある

### 研究目的

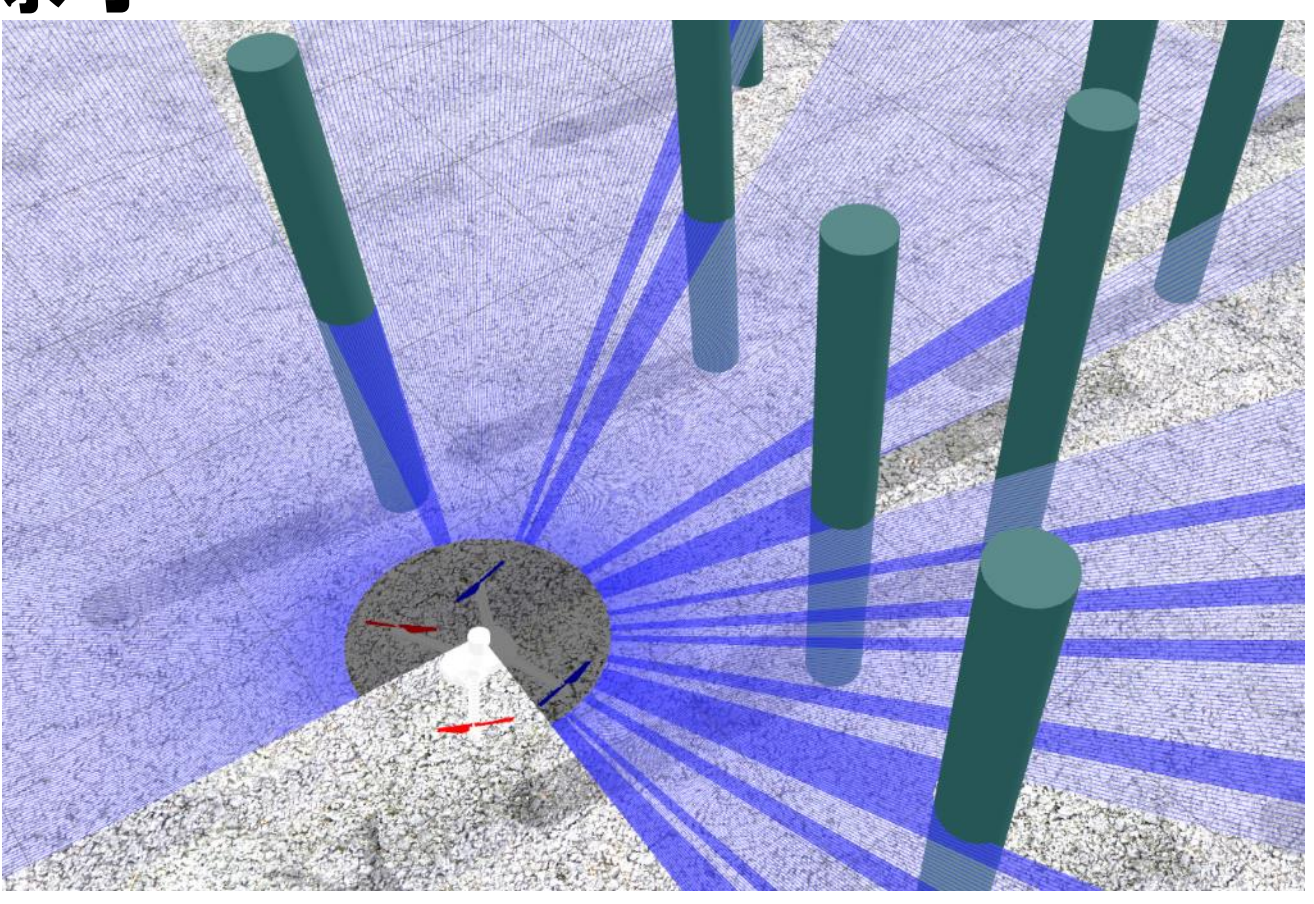
強化学習とLidarを用いて未知障害物が存在する環境においてもドローンがEnd2End方式で障害物を回避しながら目的地へ到達することを目指す

### 制御系概要

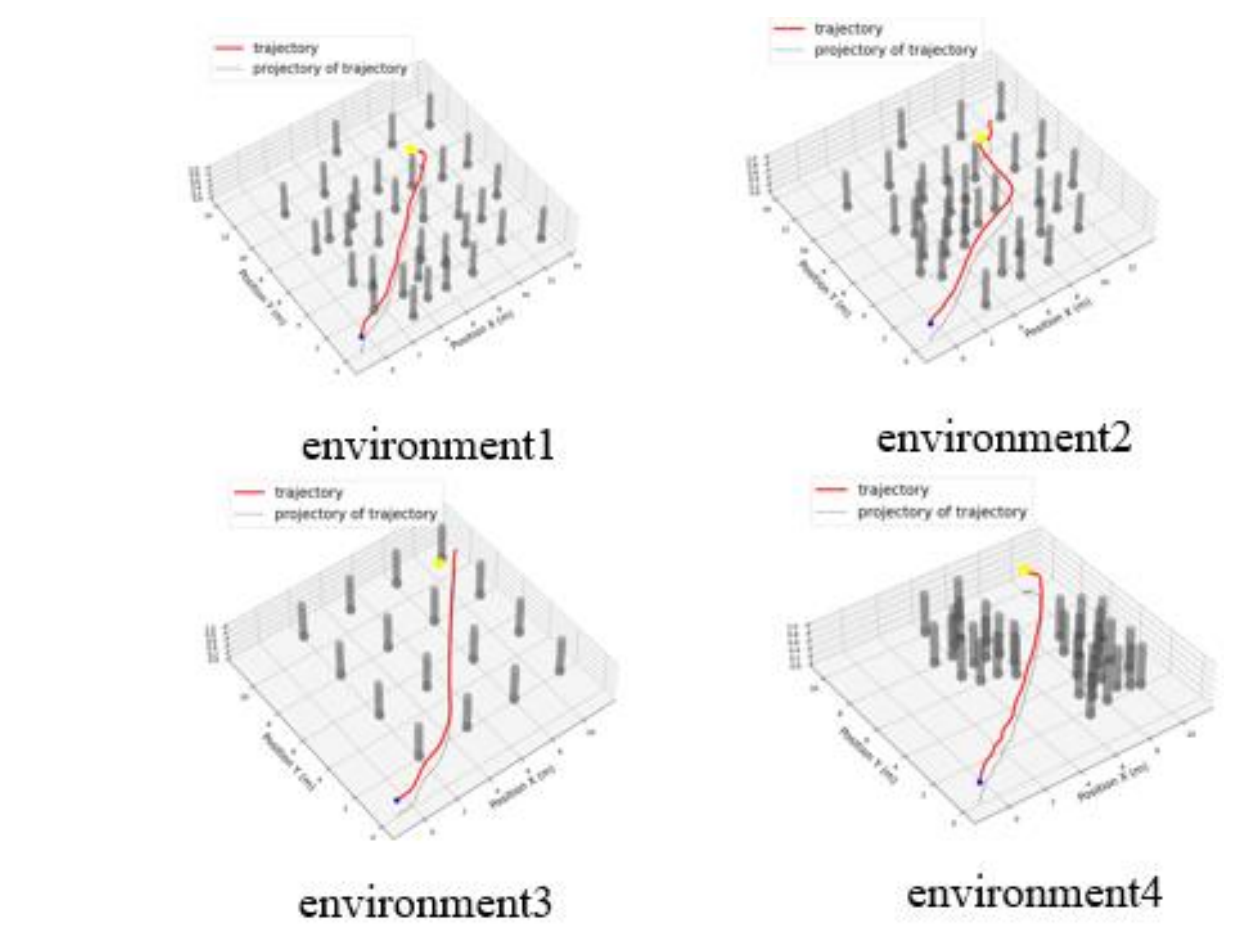
センサーから収集した，環境とドローンの状態に関する情報を並行して処理し，End2End 方式で，下位制御系に直接供給される制御コマンドを生成する



### 学習の様子



### 結果



## 深層強化学習を用いたドローンの動的障害物回避

### 研究背景

- ドローンのレベル4飛行解禁
- 活用範囲の拡大

→ 有人地帯での補助者なし目視外飛行が可能  
飛行できる機体の条件に自律飛行制御

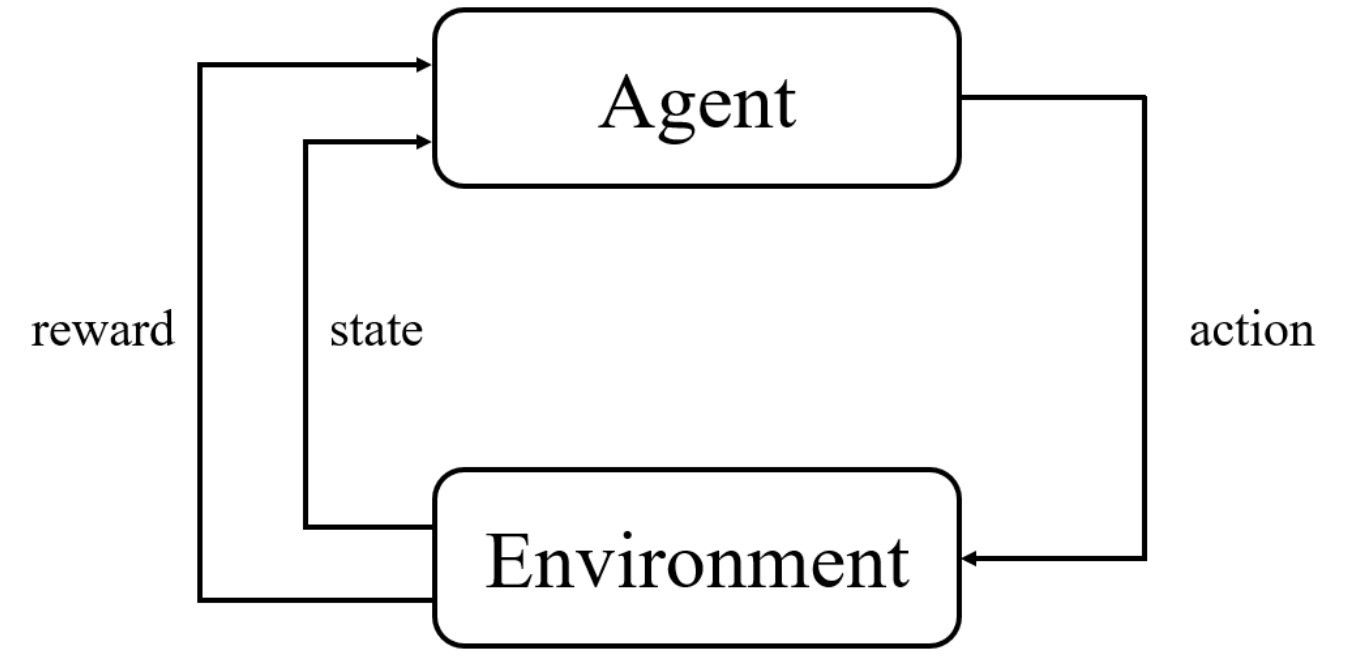
→ 人，鳥，建物などの障害物が存在する環境での動作

### 研究目的

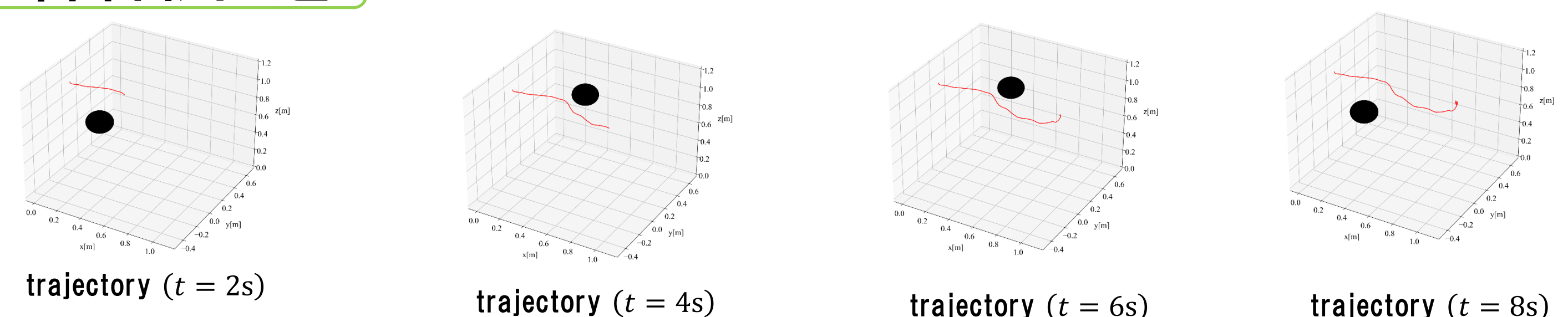
深層強化学習を用いてドローンが最適な行動を学習することで，人や鳥などの動的障害物を避けて自律飛行することを目指す

### 深層強化学習

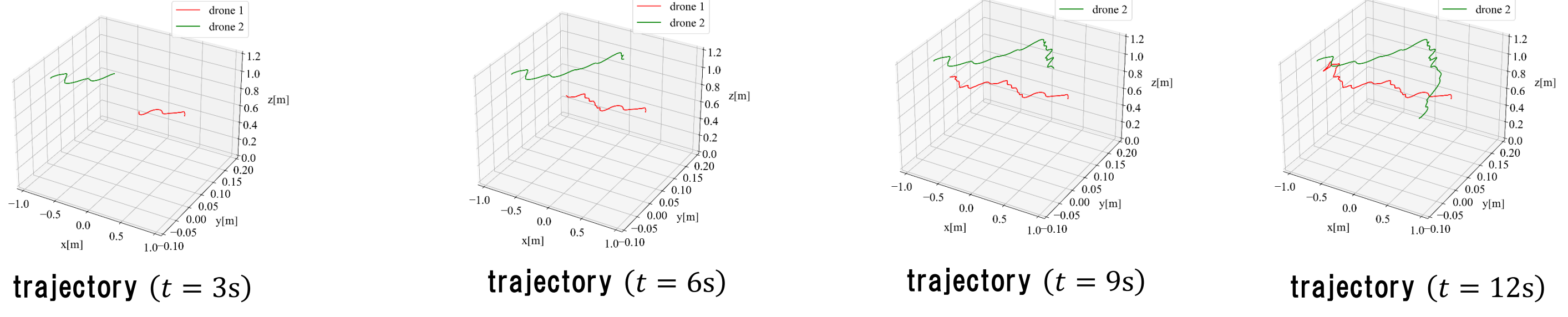
エージェントが環境との相互作用を通じて最適な挙動を学習



### 動的障害物回避



### 2機体の衝突回避

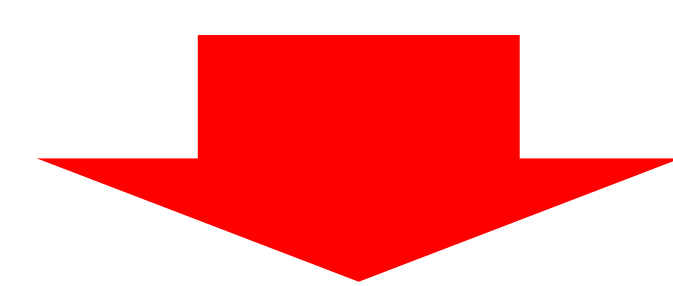




## エネルギー効率向上を目的とした固定翼UAVの飛行制御に関する研究

### 研究背景

電動UAVは飛行時間が短いため、エネルギー効率の良い飛行が必要となる



大型鳥類が行う **ソーリング飛行** に着目

### ソーリング

風を上手く利用し、エネルギーを節約しながら飛行する方法

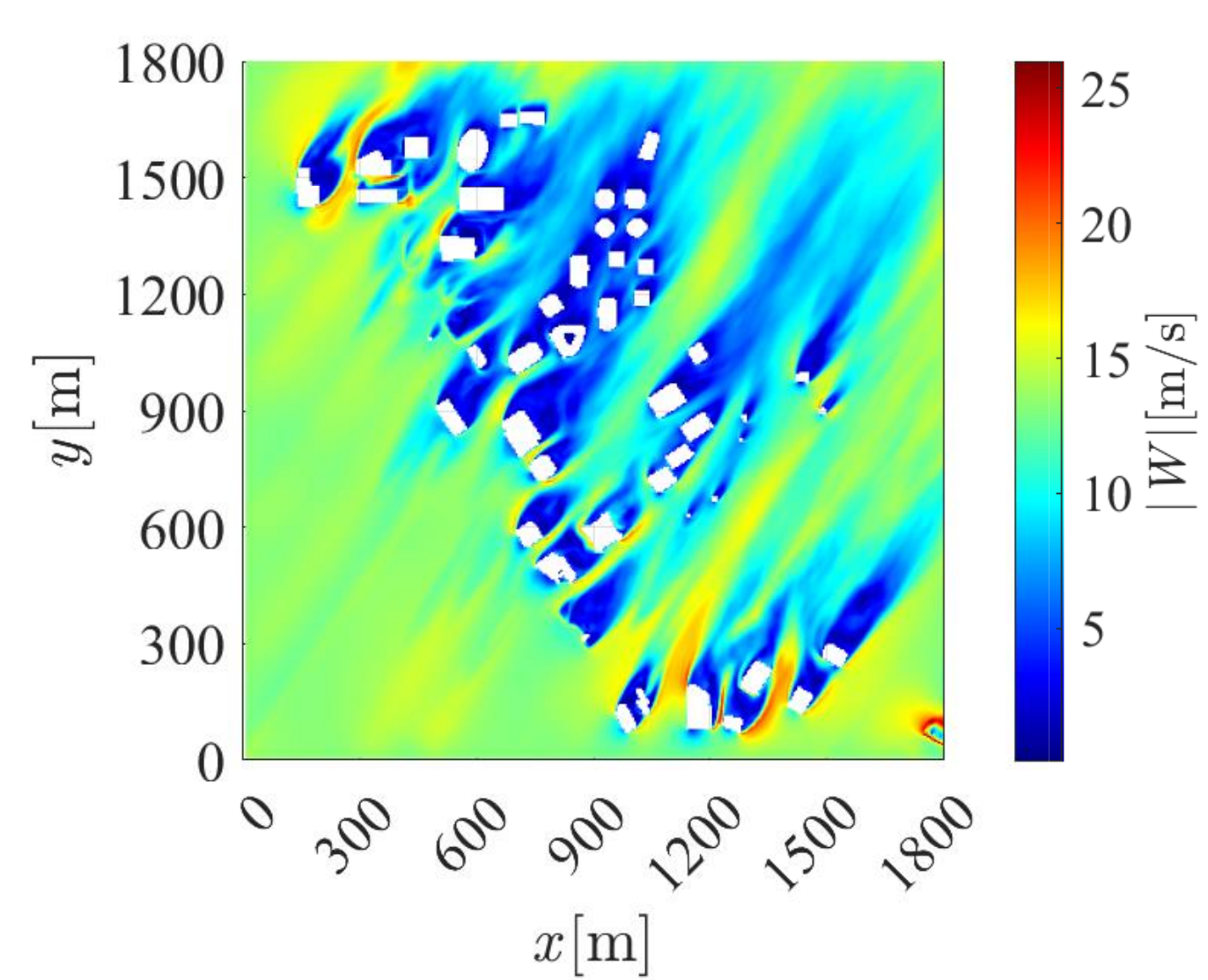
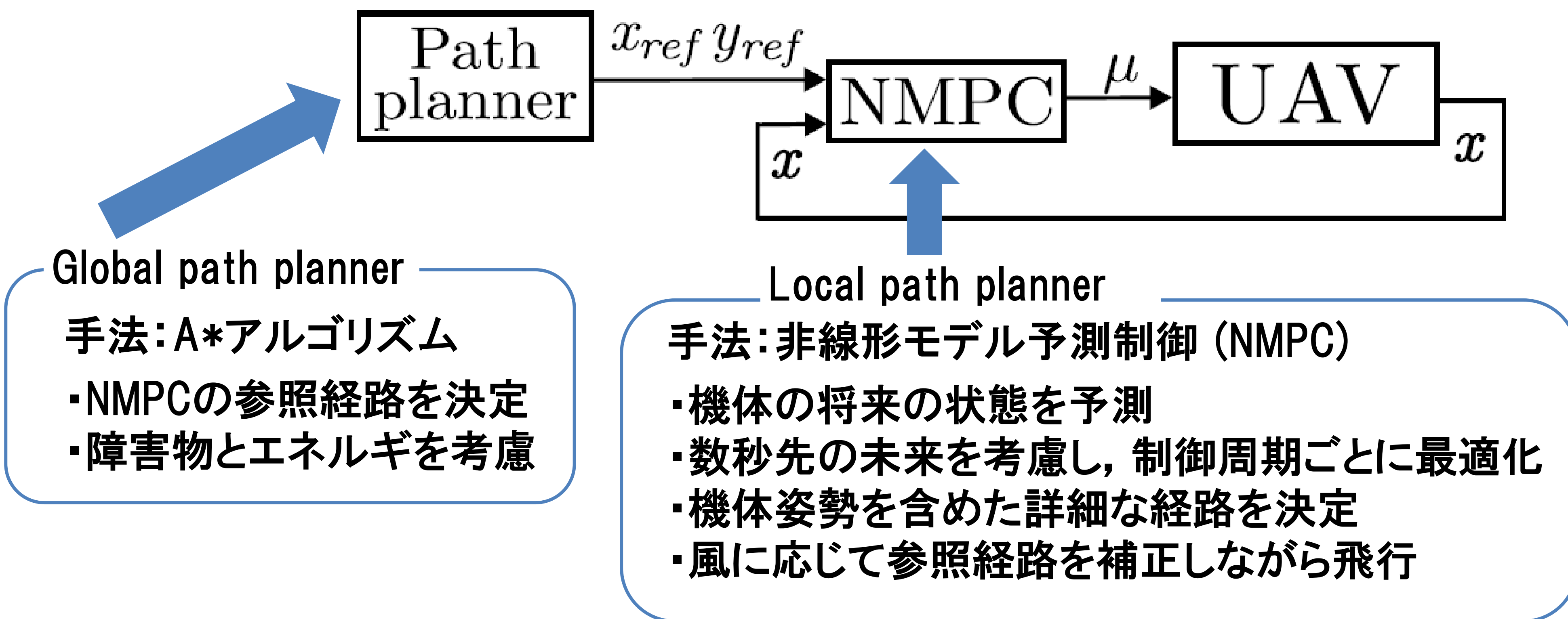
### 本研究の目的

風を利用したエネルギー効率が最適な経路計画の実現

### ➤ 固定翼UAVの概観



### ・誘導制御系の構成



シミュレーションに使用する風環境

### 評価関数

$$J = \varphi(\mathbf{x}(t + T_f), t) + \int_t^{t+T_f} L(\mathbf{x}(\tau, t), \mathbf{u}(\tau, t), t + \tau) d\tau$$
$$\varphi(\cdot) = \frac{1}{2}(x_p(t + T_f) - x_{ref})^2 S_x + \frac{1}{2}(y_p(t + T_f) - y_{ref})^2 S_y$$
$$L(\cdot) = \frac{1}{2}(x_p(\tau, t) - x_{ref})^2 Q_x + \frac{1}{2}(y_p(\tau, t) - y_{ref})^2 Q_y$$
$$+ \frac{1}{2}\mu(\tau, t)^2 R_\mu + \underline{D(\tau, t)V(\tau, t)Q_{ene}}$$

NMPCの評価関数に、エネルギーを考慮した項を導入することでエネルギー消費の低減が期待できる。

現在MATLABによる数値シミュレーションで検証を行っている  
今後、動的な風環境下での検証も予定している

## ミリ波レーダーを用いた屋内ナビゲーションに関する研究

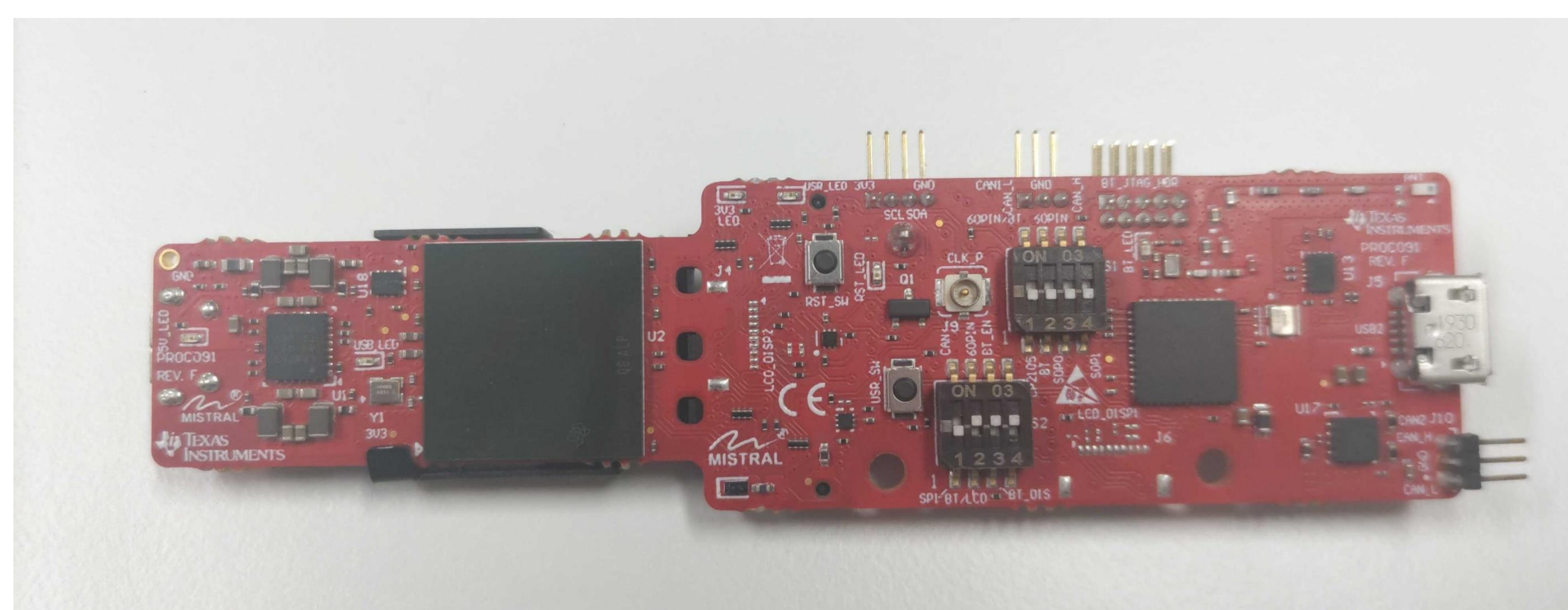
### 研究背景

- ・自律制御を行う上で自己位置推定が必須
- ・屋内で霧や埃が舞う環境を想定
  - ×GPS ×カメラ △LiDAR
  - 耐環境性に優れたミリ波レーダーを用いた自己位置推定システム

### 研究目的

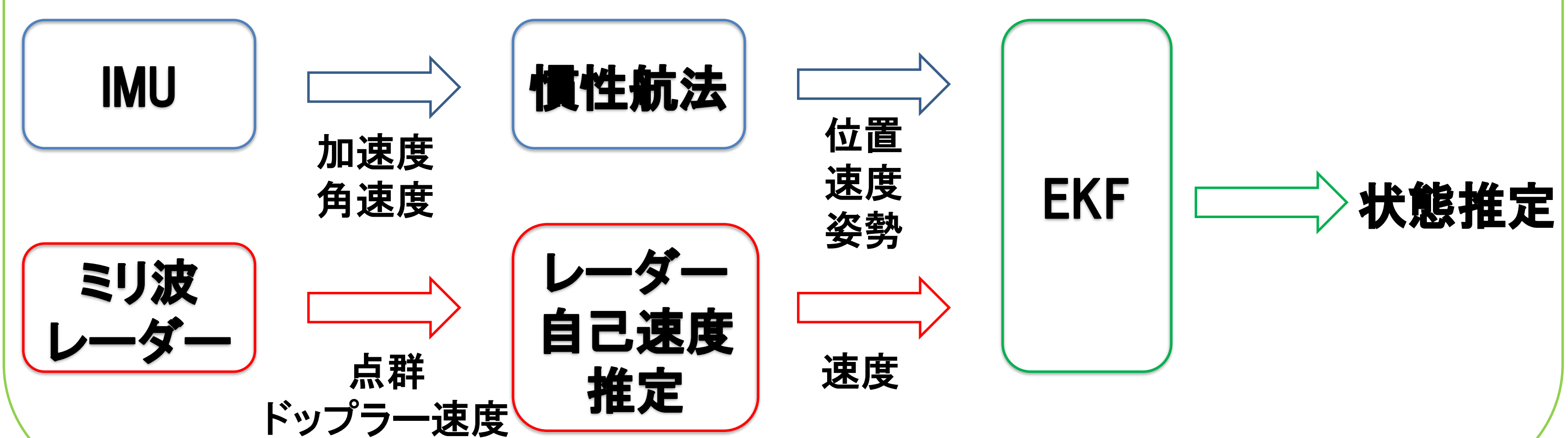
- ・ミリ波レーダーを用いた自己位置推定手法を実機に実装し、実環境で性能を検証する
- ・現状のミリ波レーダーを用いた自己位置推定手法の課題を抽出し、新たな手法の開発に生かす

### ➤ 本研究に使用したミリ波レーダー



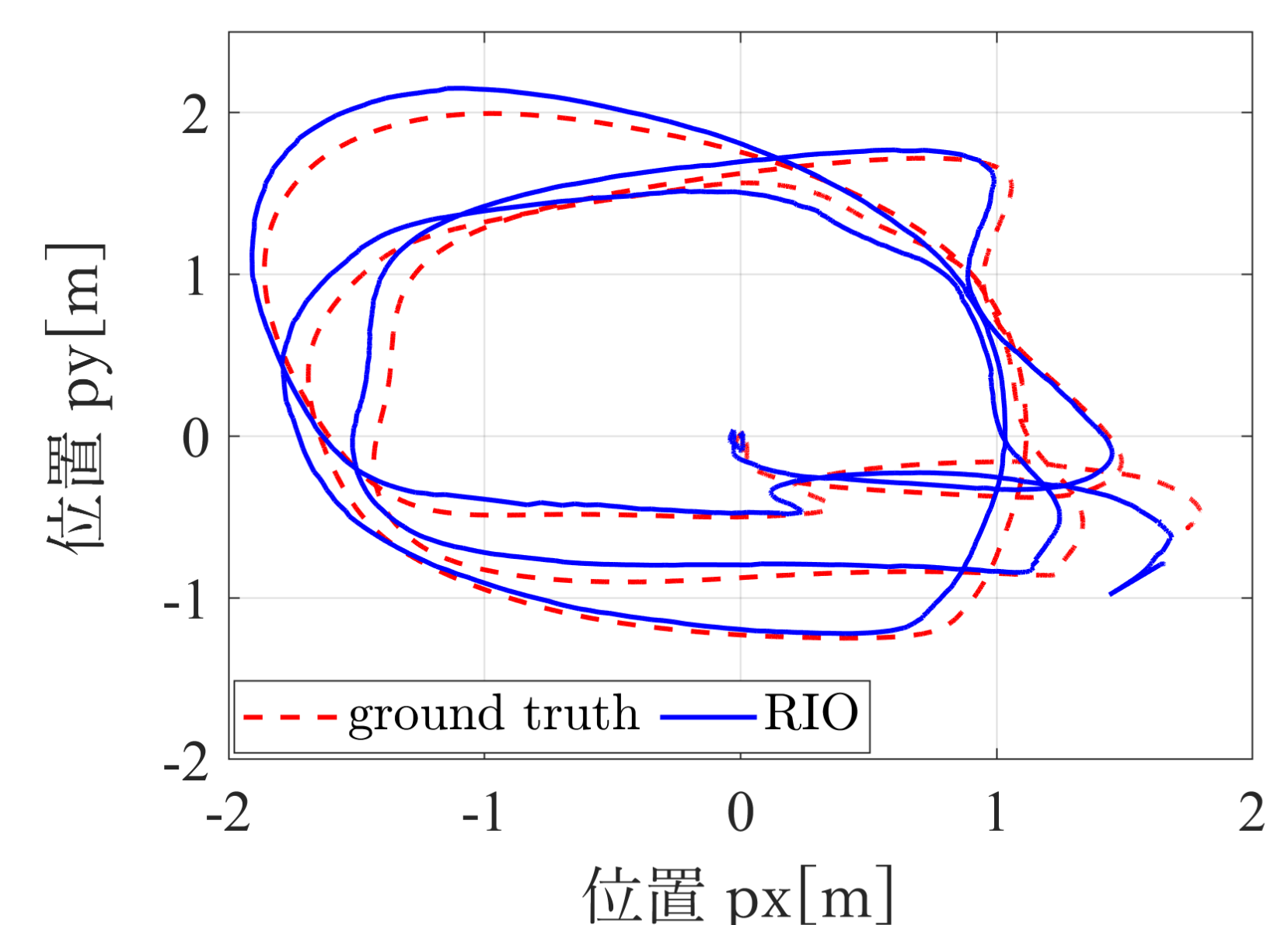
### システムの概要

- ・位置、速度、姿勢をリアルタイムで推定
- ・拡張カルマンフィルタによるデータの統合



### 実機実装による性能検証

- ・Jetson NANO, Pixhawk6c
- ・モーションキャプチャと推定値を比較





# スライディングモード制御に基づく風擾乱下での高精度軌道追従制御

## 研究背景

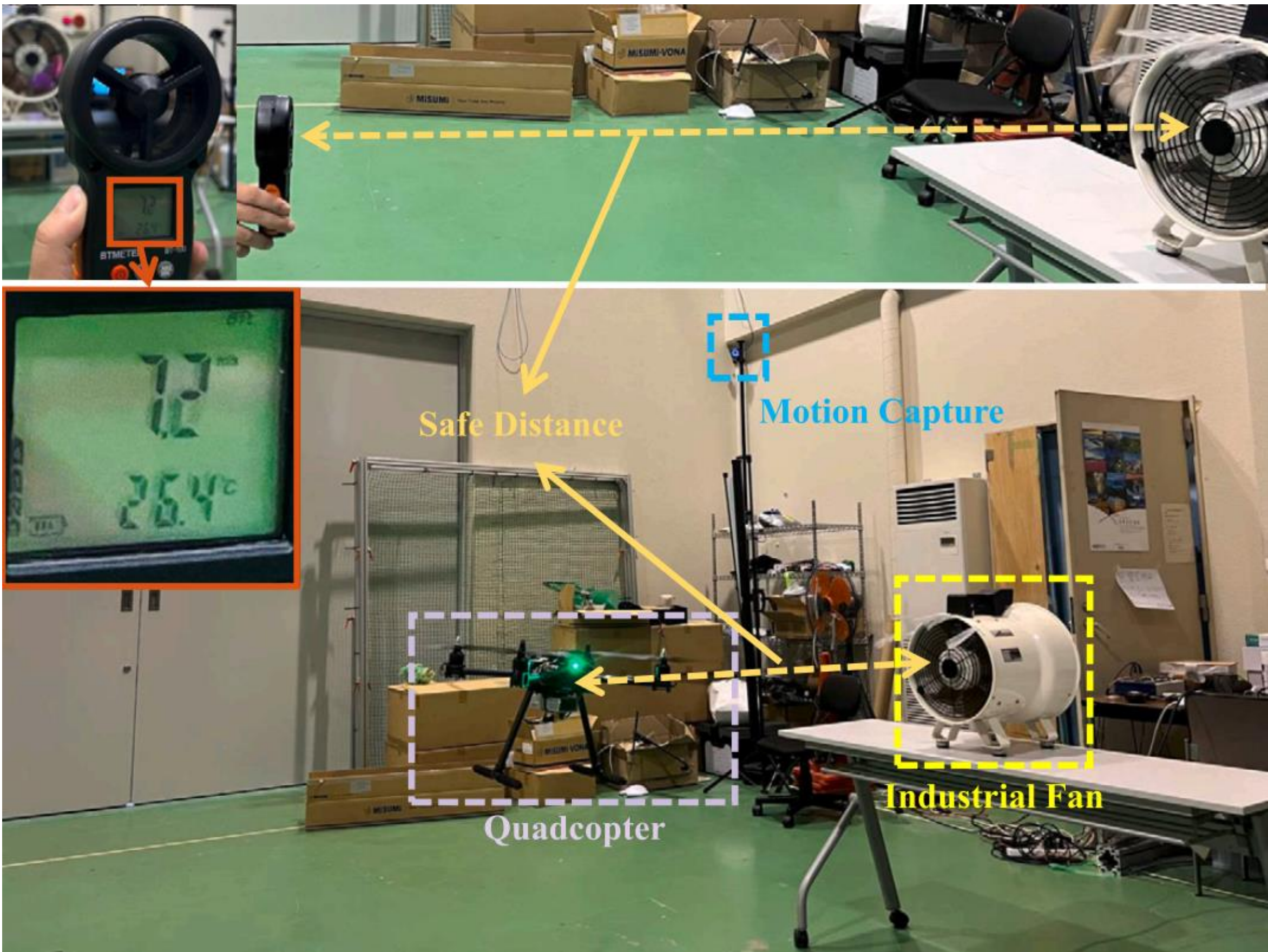
風擾乱を扱った研究は数多くあるが、擾乱補償の適時性についてはほとんど議論されていない

## 本研究の目的

風擾乱，特に平均風とウィンドシアアの2種類の擾乱下での軌道追従に焦点を当てる 外乱を補償した後，参照モデル※に基づいて新しい外乱防止スライディングモード制御を設計することを目指す。

※推定精度を向上させた状態補償関数オブザーバ（SCFO）微分構造を採用し，参照モデルと状態フィードバックを組み合わせることで，位置と速度の追跡誤差を利用する。

※最終的な制御計算には参照モデルに基づくSMCが採用され，SCFOとトラッキング微分器（TD）によって推定された全外乱とその変動が出力で補償される



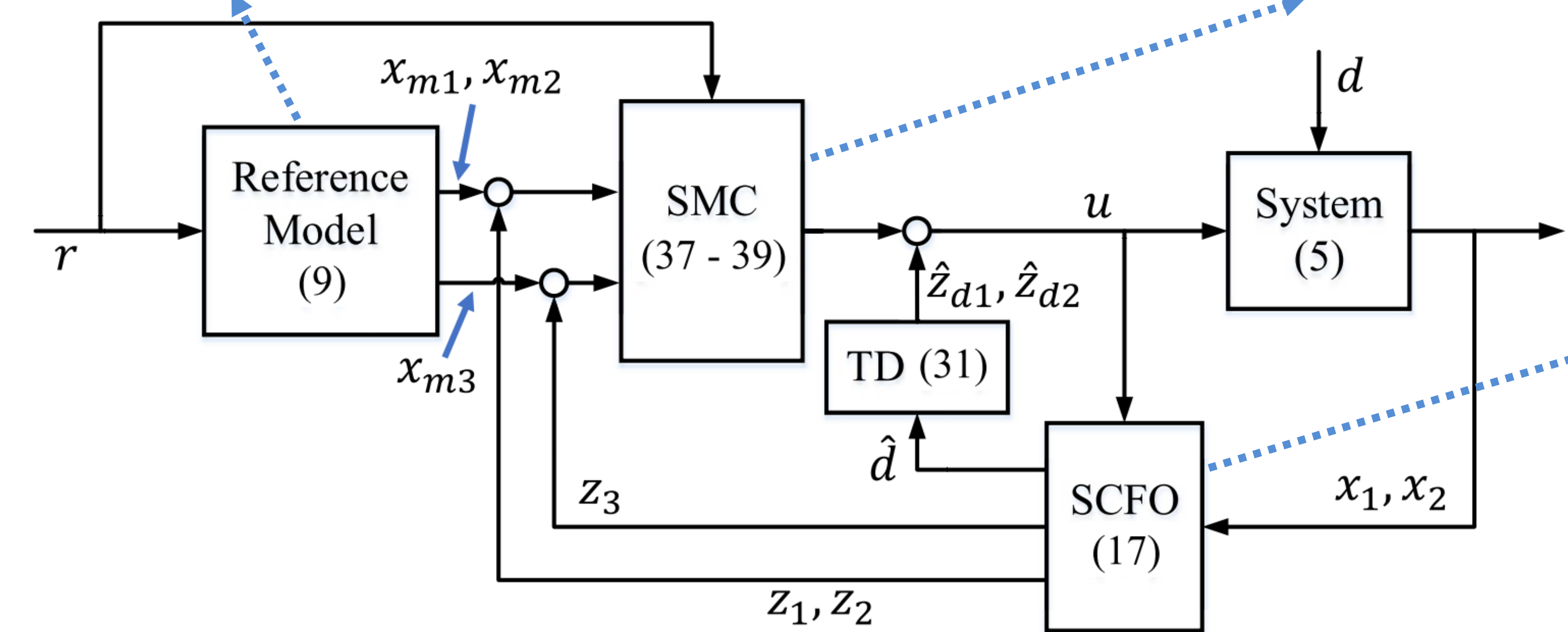
## 制御手法

さらに，滑らかな目標や微分の推定を行うために，参照モデルを利用し，より包括的な目標状態を得る

$$\begin{cases} \dot{X}_m = A_m X_m + B_m r, \\ Y_m = C_m X_m. \end{cases} \quad X_m = [x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}]^T$$

超平面は追従誤差に基づいて設計され，チャタリングを低減するために平滑関数が使用され，最終的に推定された外乱とその変動を補正する

$$\begin{aligned} \sigma &= S_c E, \\ u_{eq} &= -(S_c B)^{-1} S_c K_1 X - (S_c B)^{-1} S_c A_m E + K_0 r \\ u_{sw} &= K_{sw} f(\sigma) \quad f(\sigma) = \frac{\sigma}{|\sigma| + \zeta}, \\ u &= u_{eq} + u_{sw} - \lambda_1 \tilde{z}_{d1} - \lambda_2 \tilde{z}_{d2}, \end{aligned}$$



線形拡張状態オブザーバに基づき，SCFOを提案し，その非遺伝的な形態と不十分な情報の利用を改善する

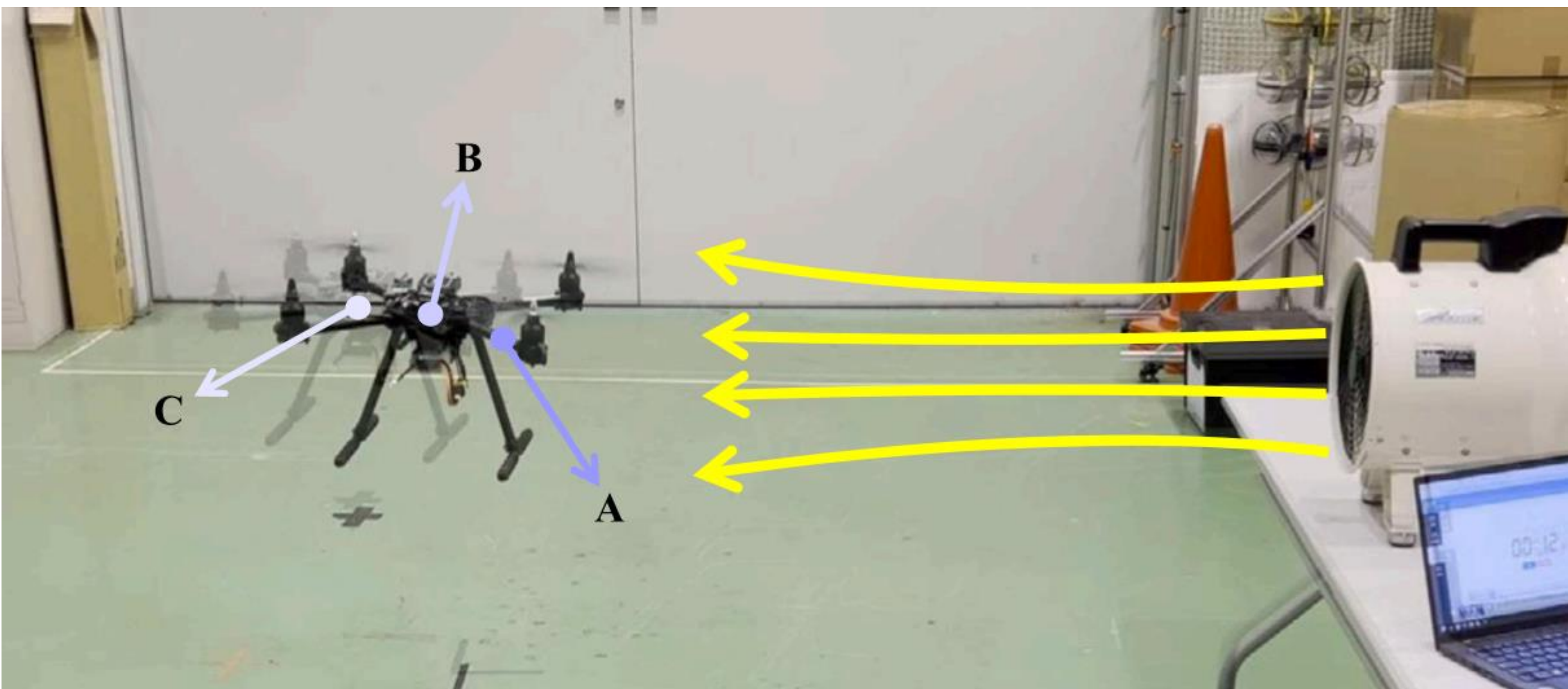
$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = z_3 + l_1 e_{z2}, \\ \dot{z}_3 = z_4 + K_z E_z + bu, \\ \dot{z}_4 = l_2 K_z E_z, \end{cases}$$
$$E_z = [x_1 - z_1, x_2 - z_2]^T = [e_{z1}, e_{z2}]^T$$

## 検証実験

平均風での実験:

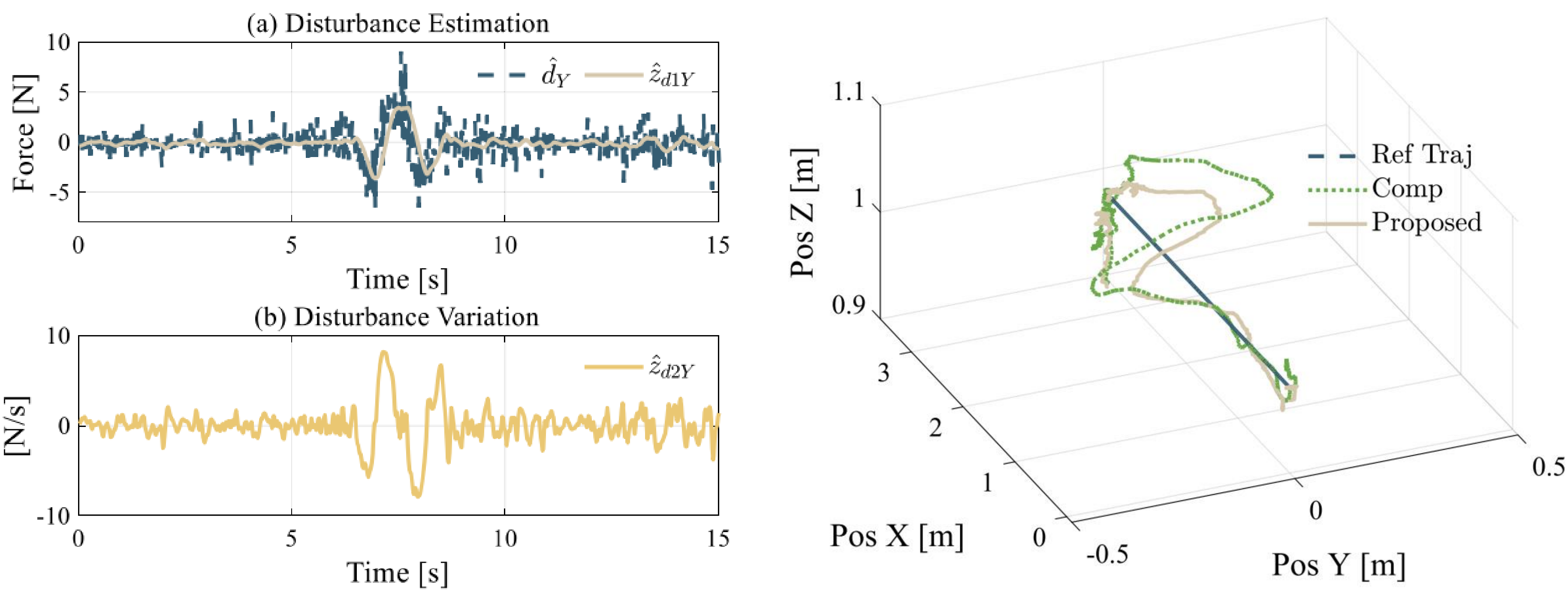
- Point A:目標位置;
- Point B:提案手法の最大オフセット;
- Point C:比較手法の最大オフセット;

本環境におけるホバリング検証により，提案手法の優れたホバリング性能が実証された 具体的には，提案手法の最大ホバリング誤差は比較手法の61.2%であった



## ウィンドシアフィールドでの実験

このような環境下での軌道追従では，外乱変動を捕捉し，制御に取り込むことで，追従精度を大幅に向上させることができる





## VTOL-UAVの飛行安全性向上を目的としたモーフィング翼の開発

### 研究背景

近年，UAVは様々な分野で活躍しており，これからさらに幅広い活用が期待されている。固定翼UAVは長距離で高効率な飛行ができるが，俊敏な飛行が不得意である

- いきなり現れる障害物を避けられない
- 障害物を避けられても失速の危険性がある

### 本研究の目的

鳥のように俊敏な動きを可能にする翼を開発

### ・モーフィング翼

Morphing：変形する，姿を変える

モーフィング翼→変形する翼

変形することで，翼の空力特性を変化させる

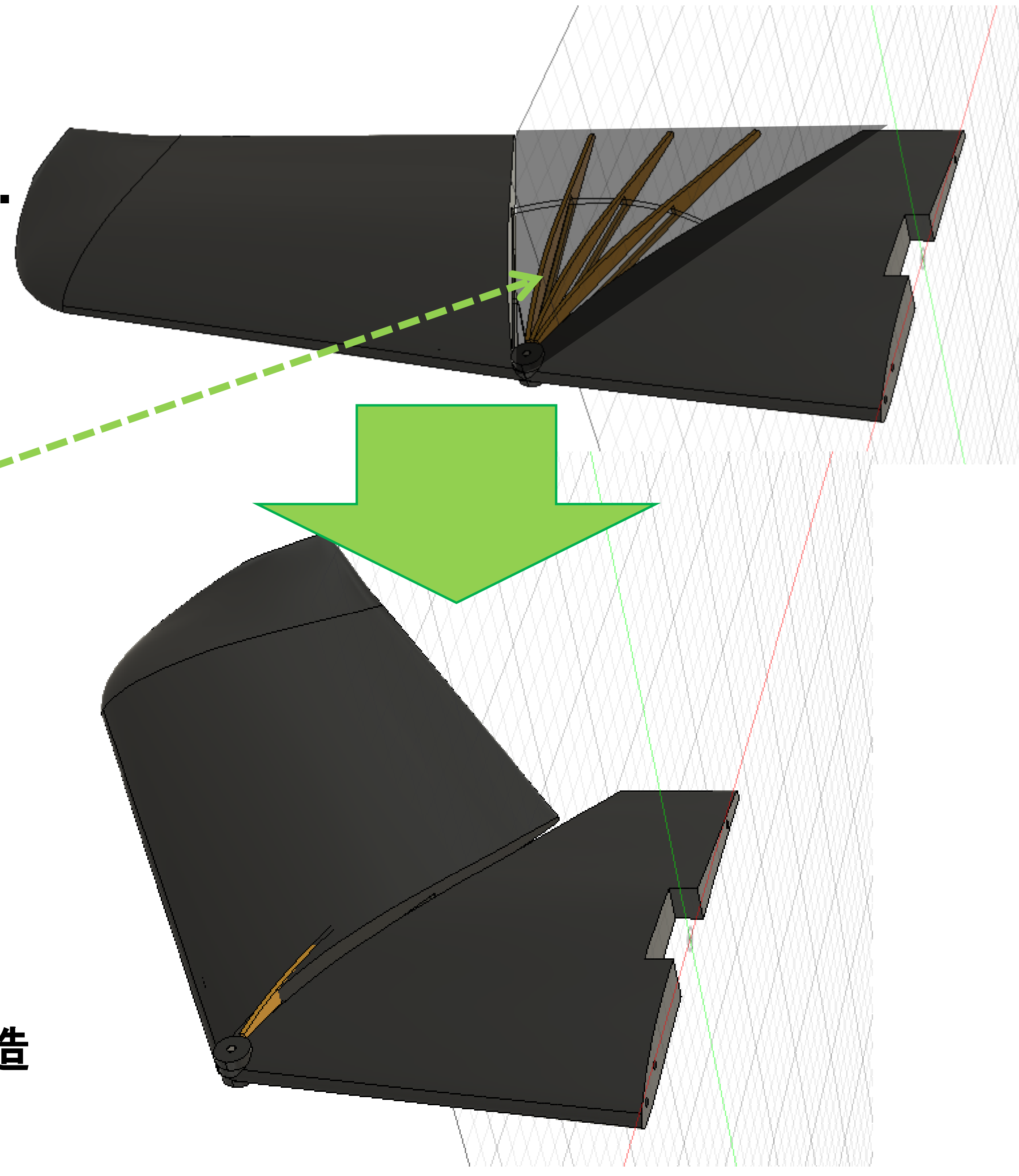
#### モーフィングによる効果

- 俊敏な動きが可能になる
- 失速迎角を小さくできる→失速回避
- 高速飛行における空気抵抗を低減→効率向上
- 翼幅を小さくできる→狭い隙間を通過可能



[https://spap.jst.go.jp/asean/news/210503/topic\\_na\\_03.html](https://spap.jst.go.jp/asean/news/210503/topic_na_03.html)より引用

コウモリの翼に着想を得た翼構造



## 閉空間内での検査業務におけるクアドローターの視覚ベース飛行評価

### 研究目的

- 畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を使用した検査品質の評価
- CNN とライトハウスシステムの標準偏差と最大エラーメトリックを使用したホバリングパフォーマンスの評価
- CNN とライトハウスシステムのRMSEを使用した軌道追跡パフォーマンスの測定



### 研究計画

- 評価環境の作成  
検査シナリオをシミュレートするための閉空間環境を構築する
- 検査用CNNの開発  
QRコードおよび欠陥(ひび，錆)を検出し，検査品質，距離，角度を出力するCNNを訓練する
- 予備テスト  
様々な光条件，高度，速度，風条件下でQRコードを用いたテストを実施する
- 地上真実との比較  
ライトハウスシステムの測定値とCNNベースの評価を検証する
- 飛行性能の向上  
検査中にCNNの出力を使用して飛行経路とホバリングの安定性を改善する
- 室内検査業務  
相対位置測定を用いて室内環境での欠陥検出業務を実施する
- 実際の検査  
実際のトンネルでの検査を拡張し，現実の条件での性能をテストする



## データ駆動型MPCに基づく狭隘空間における飛行リスク回避に関する研究

### 研究背景

- 人間が立ち入れない狭いトンネルの点検などでドローン活用の期待
- 狭隘空間において自機のプロペラによる風の乱れが大きく，ドローンが墜落するなどのリスクが存在

### 研究目的

- 狭隘空間において飛行リスクとなる条件(姿勢，速度，高度など)の特定
- 特定した条件をもとにリスクを回避する評価関数を考案
- シミュレーションおよび実機実験による検証

### これまでの取り組み

右に示す実験環境(狭隘空間)で飛行リスク条件を特定する(研究計画第1項)ための実験を実施



実験に使用しているドローン

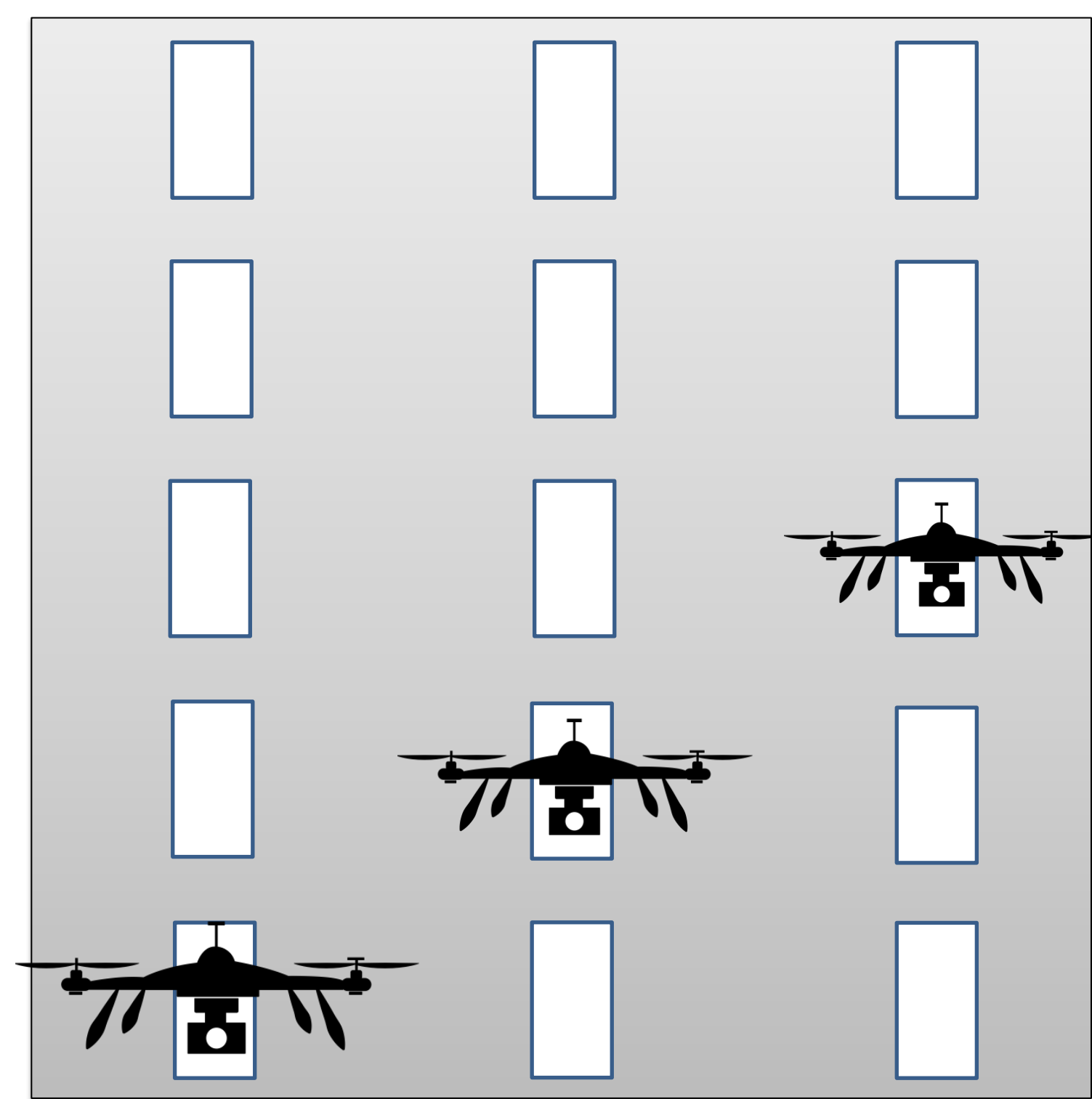
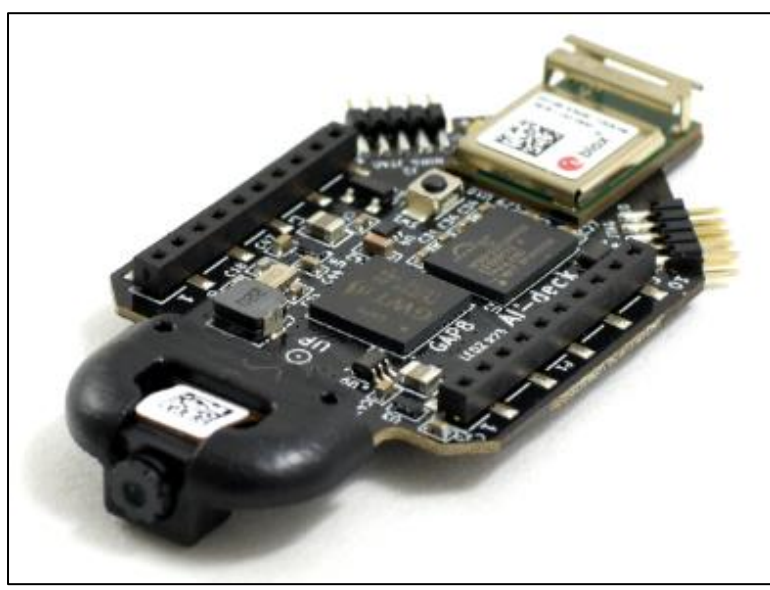
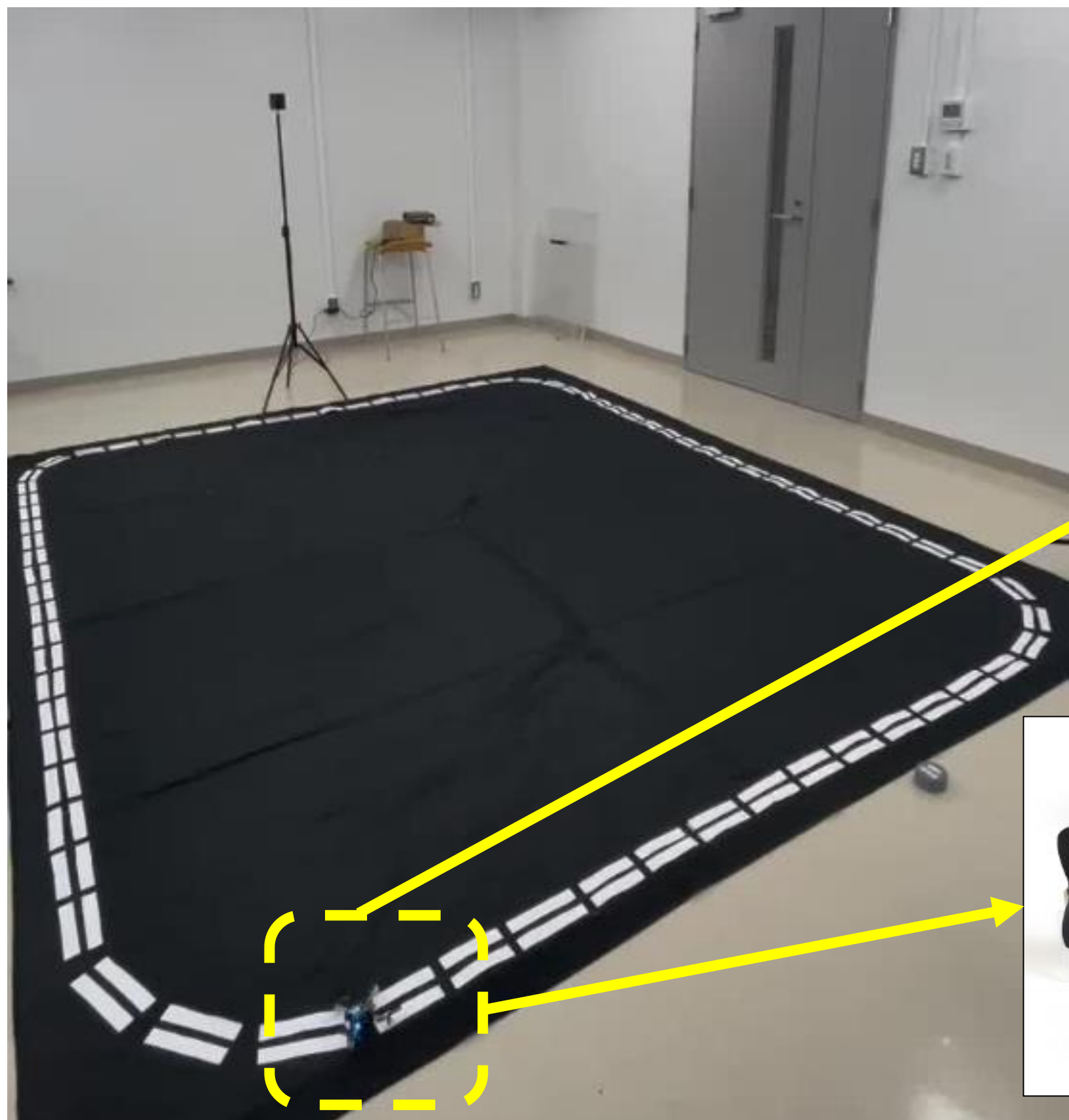




## ナノUAVを用いた自律ドローンレースに関する研究

### 研究目的

- 1.静的障害物のある複数のレーンを備えたドローンレースアリーナの開発
- 2.AI デッキを使用した，Crazyflie のレーンと障害物の視覚ベースの検出
- 3.ラインパターンに従い，静的および動的障害物（他のUAV）を回避し，レーンを変更するためのUAVガイダンス，ナビゲーション，および制御の開発



### 研究計画

1. ラインパターンをトレースし，ラインパターンの方向に向かって自律的に飛行できる CNN を開発する
2. ゲームパッドまたはキーボードを使用して，UAVの前進速度の変更，停止，レーン変更，上下移動を可能にする，人間が操縦する飛行制御を開発する
3. ドローンレースアリーナでの人間が操縦するマルチUAV レースの実現
4. 静的および動的環境を自律的に回避するための AI ベースのモーションプランニングを開発する
5. ドローンレースアリーナでの自律型と人間が操縦するマルチUAVレースの実現

## 狭隘空間での空力効果を考慮したドローンシミュレータの開発

### 研究背景

煙突，下水道管，天井裏などの狭隘空間における点検にドローンの活用ニーズが急速に高まっている

### 問題点

地面効果，天井効果，壁効果などの影響を受ける

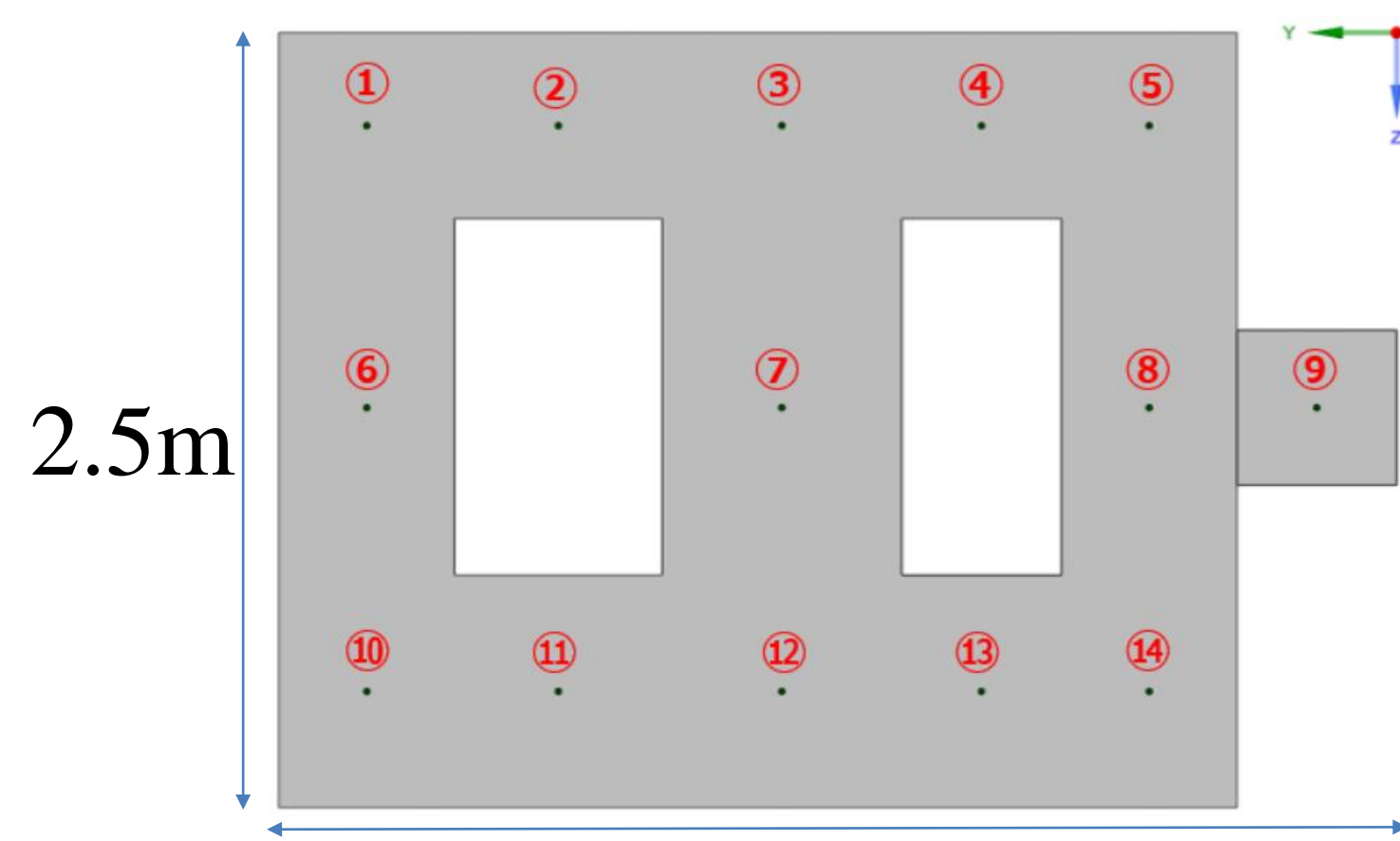
墜落の危険性がある

### 本研究の目的

本研究では，流体解析ソフトと動力学シミュレーションを組み合わせ，狭隘空間における空気力学的影響を考慮できるドローンシミュレータを開発することを目的とする



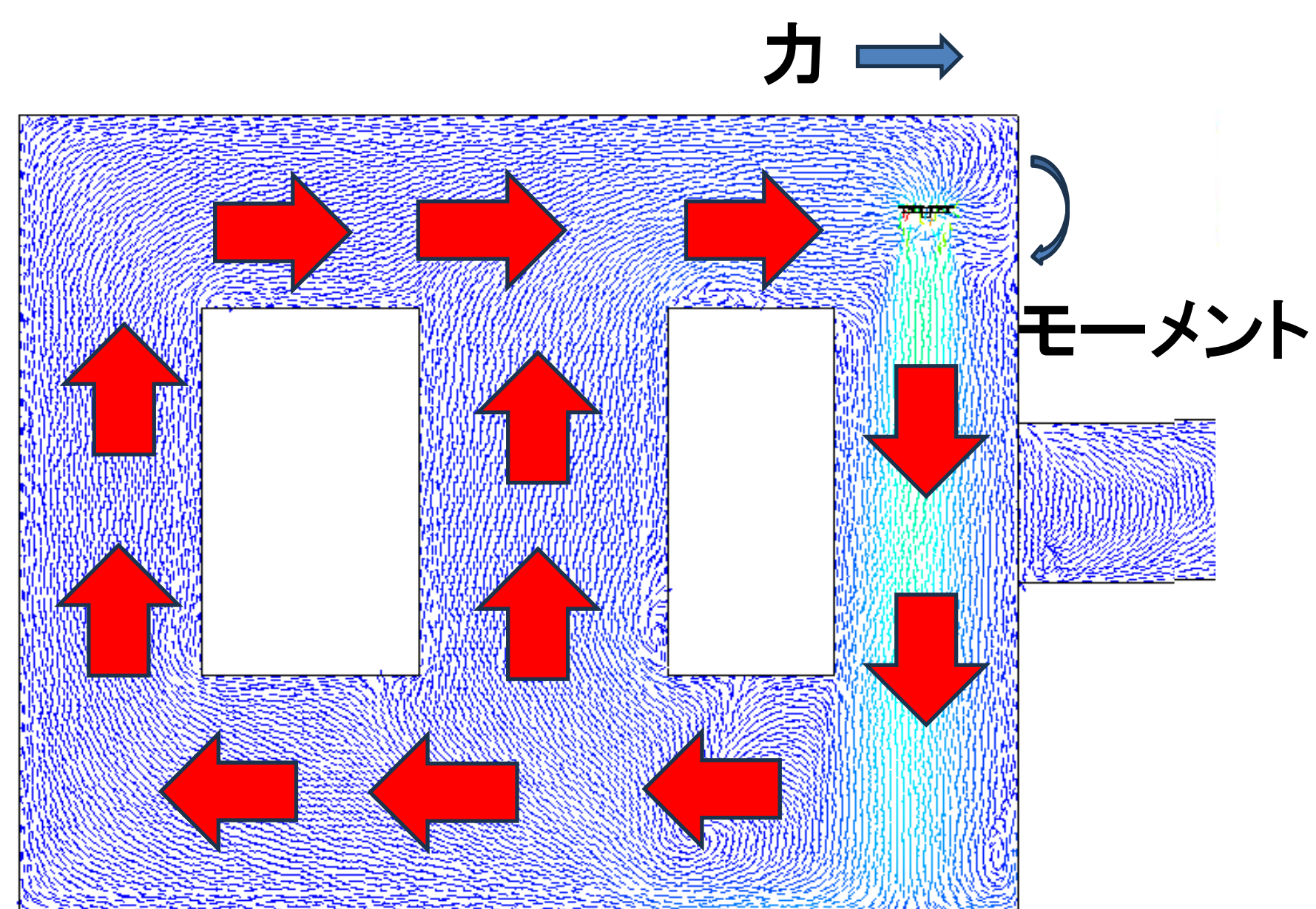
機体モデル



狭隘空間環境

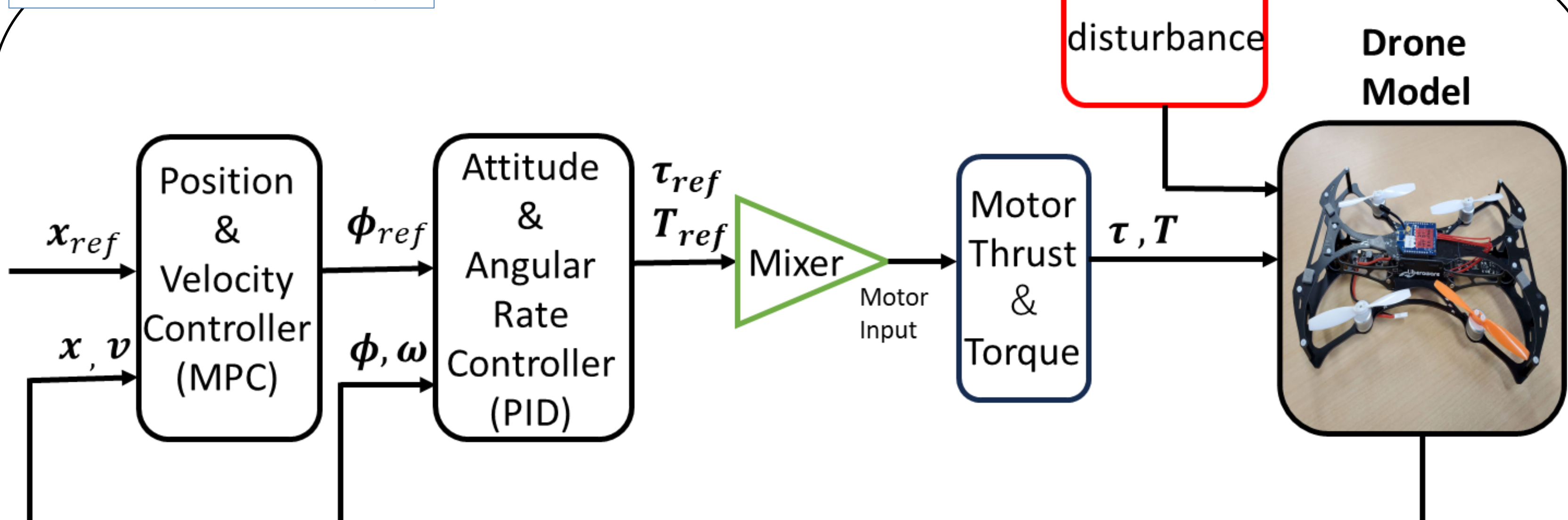
### 流体解析

右上図に示す14ポイントで流体解析を行い，各ポイントでドローンにかかる力とモーメントを出力する



流体解析結果

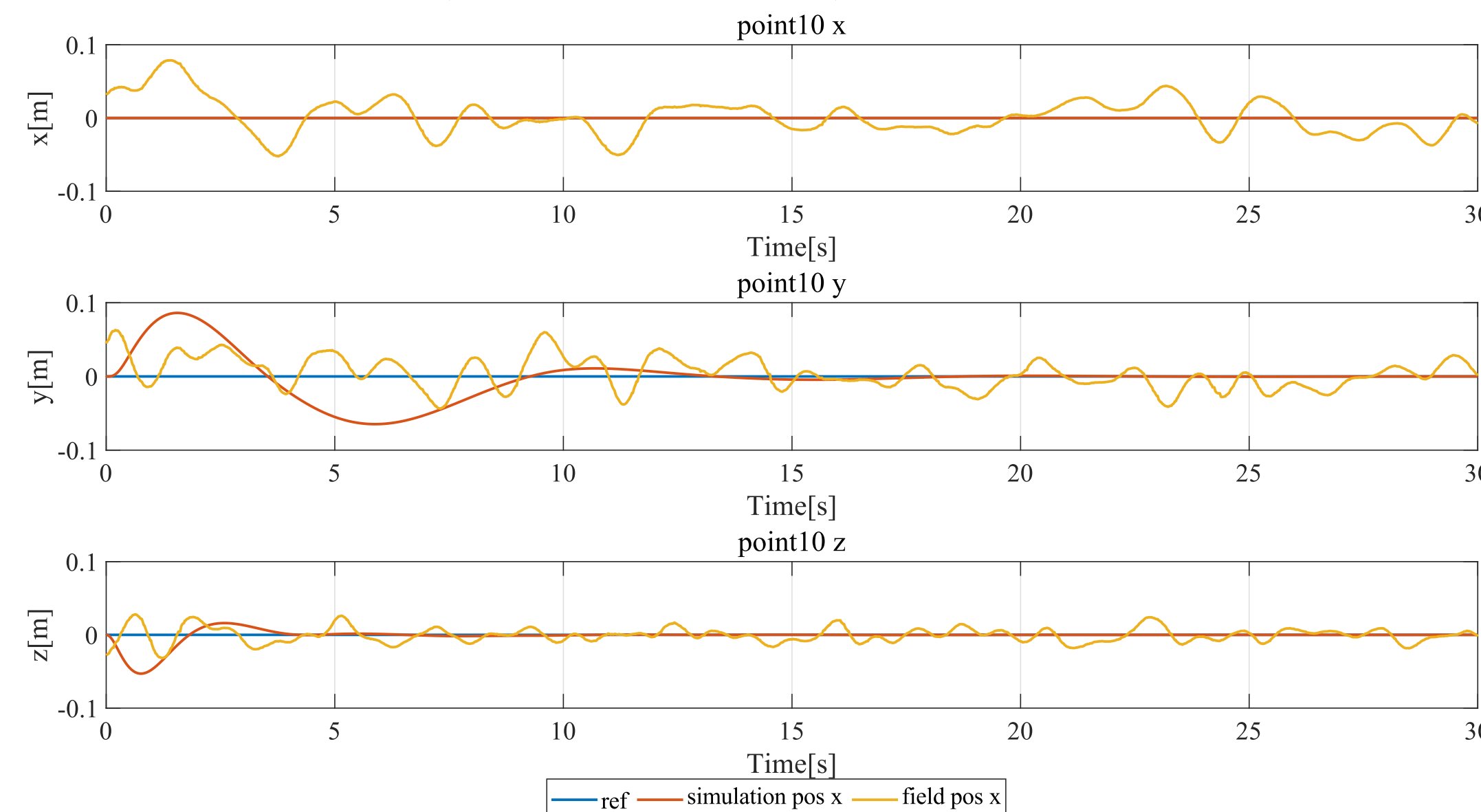
### シミュレータ概要



シミュレータ内では，機体が各ポイントに移動した際に流体解析によって得られた力とモーメントを外乱(上図赤枠)として与える

### シミュレーション結果

➤ 左下の角(ポイント10)におけるホバリング時の挙動と様子



- 実際に飛行させた際には壁に吸い寄せられるような挙動をしています
- シミュレーションでも同様に機体が壁に吸い寄せられる挙動を示しました

### 今後の展望

- 非定常解析を用いて，流体による機体への影響の時間変化を考慮することで，シミュレータで実際の流体的影響を再現することを目指す